SCIENCE et VIE

NUMÉRO HORS SÉRIE

LA MÉTÉO

JE N'AI QU'UN REGRET

c'est de n'avoir pas connu plus tôt

l'école universelle

par correspondance **59, bld Exelmans, PARIS 16e**

COURS DE REVISION POUR TOUS LES EXAMENS
de l'enseignement secondaire et supérieur.

Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :

T.C.063 : TOUTES LES CLASSES, TOUS LES EXAMENS : du cours préparatoire aux classes terminales A, B, C, D, E, - C.E.P., C.E.G., B.E., E.N., C.A.P., B.E.P.C., Baccalauréat - Classes préparatoires aux Grandes Ecoles - **Classes des Lycées Techniques :** Brevet de Technicien, Baccalauréat de Technicien.

E.D.063 : ETUDES DE DROIT : Admission en Faculté des non-bacheliers, Capacité, Licence, Carrières juridiques (Magistrature, Barreau etc.).

E.S.063 : ETUDES SUPERIEURES DE SCIENCES : Admission en Faculté des non-bacheliers, D.U.E.S. 1re et 2e année, Licence, I.P.E.S., C.A.P.E.S., Agrégation. **MEDECINE :** Premier Cycle, 1re et 2e année - **PHARMACIE - ETUDES DENTAIRES.**

E.L. 063 : ETUDES SUPERIEURES DE LETTRES : Admission en Faculté des non-bacheliers. D.U.E.L. 1re et 2e année, I.P.E.S., C.A.P.E.S., Agrégation.

G.E.063 : GRANDES ECOLES, ECOLES SPECIALES : Industrie Armée, Agriculture, Commerce, Beaux-Arts, Administration, Lycées Techniques d'Etat. (Préciser l'Ecole).

F.P.063.: POUR DEVENIR FONCTIONNAIRE : P.T.T., Finances, Travaux Publics, Banques, S.N.C.F., Police, Sécurité Sociale, E.N.A., Préfectures, Affaires étrangères et administrations diverses (Préciser la branche).

O.R.063 : COURS PRATIQUES : ORTHOGRAPHE, REDACTION, Latin, Calcul, Conversation.

L.V. 063.: LANGUES ETRANGERES : Anglais, Allemand, Espagnol, Italien, Russe, Chinois, Arabe, Espéranto - Chambres de Commerce étrangères - Tourisme - Interprétariat.

P.C.063 : CULTURA : Perfectionnement culturel. **UNIVERSA :** Initiation aux études supérieures.

A.G.063 : AGRICULTURE : Ecoles Nationales sup. Ecoles vétérinaires, Classes des Lycées et Collèges agricoles : B.T.A. - Industries agricoles, Arboriculture, Elevage, Génie rural - Radiesthésie, Topographie.

C.T. 063 : INDUSTRIE, TRAVAUX PUBLICS, BATIMENT : toutes spécialités, tous examens - Mécanique, Métallurgie, Mines, Chauffage, Froid, Matières plastiques, Chimie - Admission F.P.A.

L.E. 063 : ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE : C.A.P., B.P. B.T.S. - Préparations libres : Agent technique etc.

D.I. 063 : DESSIN INDUSTRIEL : C.A.P., B.P. - Mécanique Electricité, Bâtiment etc.

M.V.063: METRE : C.A.P., B.P. - Aide-métreur, Métreur, Métreur-Vérificateur.

E.C.063 COMPTABILITE : C.A.P., B.E.P., B.P., B.S.E.C., B.T.S., D.E.C.S. - **Expertise:** certificat supérieur de révision comptable, C.S. juridique et fiscal, C.S. d'organisation et de gestion des entreprises - Préparations libres - Caissier, Chef Magasinier, Conseiller fiscal.

P.R.063 : INFORMATIQUE : Initiation - PROGRAMMATION - C.O.B.O.L.- FORTRAN

C.C.063 : COMMERCE : C.A.P., B.E.P., B.P., B.S.E.C. - Employé de bureau, de banque, Sténodactylo, Représentant, Vendeur - Publicité, Assurances, Hôtellerie - C.A.P. de Mécanographe.

C.S.063 : SECRETARIATS : C.A.P., B.E.P., B.P., B.S.E.C., B.T.S. - Secrétariat de Direction, Bilingue, Médical de Dentiste, d'Avocat, Secrétariats techniques - Correspondance **JOURNALISME** - Graphologie.

R.P.063 : RELATIONS PUBLIQUES et Attachés de Presse.

C.F.063 : CARRIERES FEMININES : sociales, paramédicales, commerciales et artistiques. Ecoles : Assistantes Sociales, Infirmières, Jardinières d'enfants, Sages-Femmes, Auxiliaires de Puériculture - Visiteuses médicales - Hôtesses, etc.

S.T.063 : C.A.P. D'ESTHETICIENNE (Stages pratiques gratuits).

C.B.063 : COIFFURE (C.A.P. dame) - **SOINS DE BEAUTE** - Visagisme, Manucurie - Parfumerie - Ecoles de Kinésithérapie et de Pédicurie - Diét-Esthétique.

C.O.063 : COUTURE, MODE : C.A.P., B.P., Coupe, Couture (flou et Tailleur, Industries de l'habillement) - Enseignement ménager : monitorat et professorat.

D.P.063 : DESSIN - PEINTURE et BEAUX-ARTS : Illustration, Mode, Aquarelle, Peinture, Portrait, Caricature, Nu, Décoration - Professorats - Antiquaire.

E.M.063 : ETUDES MUSICALES : Solfège Guitare classique, électrique et tous instruments. Professorats.

C.I. 063 : CINEMA : Technique générale Scénario, Prises de de son, Réalisation, Projection Lycée technique d'Etat Cinéma 8, 9,5 et 16 mm - Histoire du spectacle - **PHOTOGRAPHIE.**C.A.P.

M.M063 : MARINE MARCHANDE : Ecoles, Navigation de plaisance.

C.M.063 : CARRIERES MILITAIRES : Terre, Air, Mer. Admission aux écoles.

C.A. 063 : AVIATION CIVILE : Pilotes, fonctions administratives, Ingénieurs et Techniciens Hôtesses de l'air. - Brevet de Pilote privé.

R.T. 063 : RADIO : Monteur, dépanneur - **TELEVISION :** Noir et couleur - Transistors.

E.R. 063 : TOUS LES EMPLOIS RESERVES : Examens de 1re, de 2e et de 3e catégorie. Examens d'aptitude technique spéciale.

La liste ci-dessus ne comprend
qu'une partie de nos enseignements

N'HÉSITEZ PAS A NOUS ÉCRIRE

ENVOI GRATUIT 098

école universelle

par correspondance de Paris

59, Boulevard Exelmans Paris 16e

14 chemin de Fabron, 06 Nice — 43 rue Waldeck-Rousseau, 69 Lyon 6e

Nom, Prénom : .....

Adresse .....

niveau d'études : .....

Diplômes ..... Age.....

Initiales et numéro de la brochure demandée

ou profession choisie

La carte physique utilisée dans le montage de couverture provient de l'Institut Géographique National.

Les documents d'illustration sans mention d'origine particulière nous ont été communiqués par la Météorologie Nationale.

SOMMAIRE DU N° HORS-SÉRIE

LA MÉTÉO

L'atmosphère vue de l'espace 6
Comprendre l'atmosphère 16
L'acquisition des données 38
Les stations automatiques 52
Radars météorologiques 54
Les données aérologiques 58
Les satellites météo 62
Les données sur les océans 65
Acheminement et traitement des données..... 70
Prévoir le temps 74
Ordinateurs et prévision..... 88
L'adaptation régionale des prévisions 94
Les échanges océans-atmosphère 99
L'assistance météorologique 106
Peut-on agir sur le temps ? 146

Tarif des abonnements : UN AN. France et États d'expr. française, 12 parutions : 35 F (étranger : 44 F); 12 parutions envoi recom. 51 F (étranger 76 F) ; 12 parut. plus 4 numéros hors série : 50 F (étranger : 62 F); 12 parut. plus 4 numéros hors série envoi recom. : 71 F (étranger : 104 F). Règlement des abonnements : Science et Vie, 5, rue de la Baume, Paris. C.C.P. PARIS 91-07 ou chèque bancaire. Pour l'Étranger par mandat international ou chèque payable à Paris. Changements d'adresse : poster la dernière bande et 0,80 F en timbres-poste. — Belgique, Grand Duché de Luxembourg et Pays-Bas (1 an) : service ordinaire FB 300, service combiné, FB 450. Règlement à Edimonde, 10, boulevard Sauvenière, C.C.P. 283-76, P.I.M. service Liège. — Maroc : règlement à Sochepress, 1, place de Bandoeng, Casablanca, C.C.P. Rabat 199.75.

Directeur général : Jacques Dupuy. Rédacteur en chef : Jean Bodet. Direction, Administration, Rédaction : 5, rue de la Baume, Paris-8e. Tél. : Élysée 16-65. Chèque Postal : 91-07 PARIS. Adresse télégr. : SIENVIE PARIS. Publicité : Excelsior Publicité, 2, rue de la Baume, Paris 8e (Ély 87-46). Correspondants à l'étranger : Washington : « Science Service », 1 719 N Street N.W. Washington 6 D.C. New York : Arsène Okun, 64-33 99th Street, Forest Hills 74 N.Y. Londres : Louis Bloncourt, 38, Arlington Road, Regent's Park, Londres N.W.I.

devenez technicien... brillant avenir...

par les **cours progressifs par correspondance**
ADAPTÉS A TOUS NIVEAUX D'INSTRUCTION
ÉLÉMENTAIRE, MOYEN, SUPÉRIEUR.
Formation - Perfectionnement - Spécialisation.
Préparation aux diplômes d'Etat : **CAP - BP - BTS,** etc.
Orientation professionnelle - Placement
COURS SUIVIS PAR CADRES E.D.F.

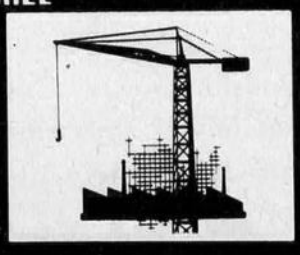
AVIATION

★ Pilote (tous degrés) (Vol aux instruments).
★ Instructeur-Pilote.
★ Brevet Elémentaire des Sports Aériens.
★ Concours Armée de l'Air.
★ Mécanicien et Technicien.
★ Agent technique.
Pratique au sol et en vol au sein des aéro-clubs régionaux

ELECTRONIQUE

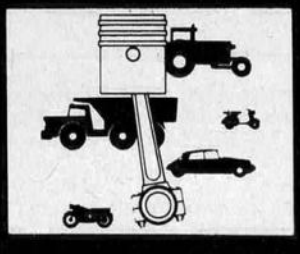
★ Radio Technicien (monteur, chef monteur, dépanneur-aligneur-metteur au point)
★ Agent technique et Sous-Ingénieur
★ Ingénieur Radio Electronicien.
TRAVAUX PRATIQUES
Matériel d'études-outillage

DESSIN INDUSTRIEL



★ Calqueur-Détaillant
★ Exécution
★ Etudes et projeteur-Chef d'études
★ Technicien de bureau d'études
★ Ingénieur - Mécanique générale
Tous nos cours sont conformes aux nouvelles conventions normalisées. (AFNOR)

AUTOMOBILE



★ Mécanicien Electricien
★ Diéseliste et Motoriste
★ Agent technique et Sous Ingénieur Automobile
★ Ingénieur en Automobile

infra
MÉTHODES SARTORIUS

sans engagement, demandez la documentation gratuite SVS
en spécifiant la section choisie (joindre 4 timbres pour frais)

infra

ÉCOLE PRATIQUE POLYTECHNIQUE DES TECHNICIENS ET CADRES
24, RUE JEAN-MERMOZ • PARIS 8e • Tél. : 225.74-65
Metro : Saint Philippe du Roule et F. D. Roosevelt - Champs-Elysees

BON Veuillez m'adresser sans engagement la documentation gratuite (ci-joint 4 timbres pour frais d'envoi) SVS
A DÉCOUPER OU A RECOPIER
Section choisie .....
NOM .....
ADRESSE .....

GALLIENA

mines et porte-mine

Mines MARS Lumograph n° 200
17 graduations rigoureuses et constantes - Opacité parfaite du trait reproductible.

Porte-mine de dessinateur. Très étudiés; pince striée bloquant la mine. Guillochage de l'embout assurant une tenue parfaite dans la main. Taille-mine dans le bouton poussoir.

Documentation sur demande

STAEDTLER

178, rue du Temple - PARIS 3e

Situation assurée

dans l'une de ces

QUELLE QUE SOIT VOTRE INSTRUCTION préparez un

DIPLÔME D'ÉTAT
C.A.P.-B.P.-B.T.N.-B.T.S.
INGÉNIEUR

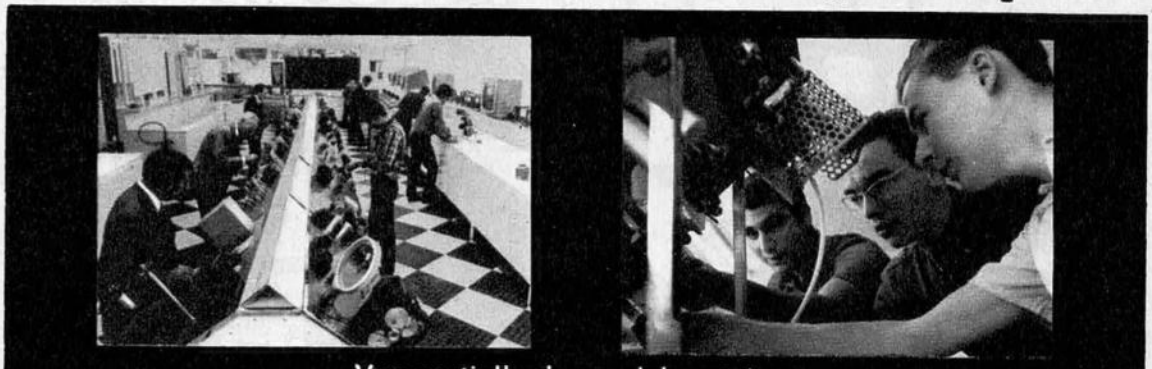
avec l'aide du PLUS IMPORTANT CENTRE EUROPÉEN DE FORMATION TECHNIQUE disposant d'une méthode révolutionnaire brevetée et des Laboratoires ultra-modernes pour son enseignement renommé.

branches techniques d'avenir

lucratives et sans chômage :

ÉLECTRONIQUE - ÉLECTRICITE - INFORMATIQUE - PROGRAMMEUR - RADIO - TÉLÉVISION - CHIMIE - MÉCANIQUE - AUTOMATION - AUTOMOBILE - AVIATION ENERGIE NUCLEAIRE - FROID - BETON ARME - TRAVAUX PUBLICS - CONSTRUCTIONS METALLIQUES - TELEVISION COULEUR

par correspondance et cours pratiques



Vue partielle de nos laboratoires

Stages pratiques gratuits dans les Laboratoires de l'Etablissement. Stages pratiques sur ordinateur - Possibilités d'allocations et de subventions par certains organismes familiaux ou professionnels - Toutes références d'Entreprises Nationales et Privées

Différents cours programmés. Cours de Promotion - Réf. n° ET 5 4491 et cours pratiques IV/ET. 2/n° 5204. Ecole Technique agréée Ministère Education Nationale.

DEMANDEZ LA BROCHURE GRATUITE N° A. 11 a :

ETMS ECOLE TECHNIQUE
MOYENNE ET SUPÉRIEURE DE PARIS

94, rue de Paris - CHARENTON-PARIS (94)

Pour nos élèves belges : BRUXELLES : 12, av. Huart-Hamoir - CHARLEROI : 64, bd Joseph II

LES GRANDES RENCONTRES EUROPEENNES

Deux grands noms de la photographie et du cinéma,
désormais au service de tous les amateurs

PHOTO PORST

la puissance de vente

La plus importante entreprise de vente de matériel photo et cinéma en Allemagne sélectionne elle-même rigoureusement les meilleures fabrications du monde entier et les offre aux amateurs sous sa propre marque dans des conditions uniques grâce à la puissance de son organisation.

Grenier NATKIN

primauté de la technicité

Le 1er spécialiste Photo-Ciné-Son de France et sa chaine de 150 spécialistes agréés ont été choisis par Photo-Porst comme concessionnaires exclusifs de son matériel parce que, seuls, ils pouvaient lui offrir en France un réseau de vente animé par des techniciens hautement qualifiés.

PHOTO-PORST et GRENIER-NATKIN pensent déjà aux beaux jours... et vous présentent, au sein de la vaste gamme Porst, deux «Reflex» de classe, aux possibilités illimitées pour la chasse aux images...

PORST FX 6

Un Reflex rapide et sûr

Appareil à prisme redresseur éclair. Miroir fixe. Obturateur à rideaux 1 sec. au 1/500e. Posemètre incorporé, couplé à l'obturateur et au diaphragme, placé derrière l'objectif. Objectif à présélection automatique interchangeable (monture vissante ⌀ 42). Avec Domiplan 2,8/50 mm.

PRIX PORST **849 F**

PORST UNIFLEX 1000 S

Un Reflex «Grand Tourisme»

Appareil à mesure de l'exposition à travers l'objectif (2 cellules CdS placées à l'intérieur du prisme). Miroir éclair. Obturateur à rideaux 1 sec. au 1/1000e. Retardement. Objectif à présélection automatique interchangeable (monture vissante ⌀ 42). Avec objectif 1,7/50 mm.

PRIX PORST **1.270 F**

Les objectifs complémentaires PORST, bien que de prix modeste, sont d'une qualité optique irréprochable. Monture normalisée permettant de les adapter sur tous les types d'appareils à monture vissante ⌀ 42 (Praktica, Yashica, Edixa, Asahi Pentax, Porst, etc...)

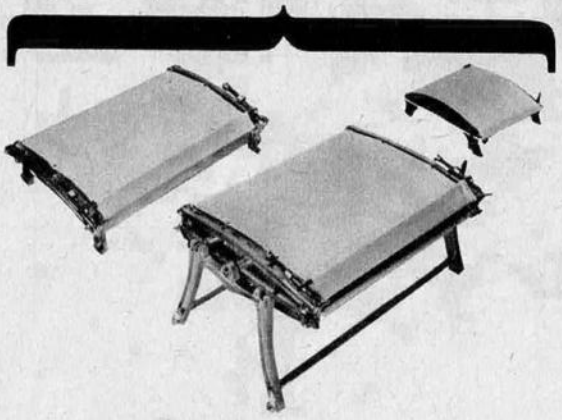
Sans présélection automatique		Avec présélection automatique	
Grand angle 3,5/35 mm	198 F	*Longue focale 2,8/135 mm*	450 F
Super grand angle 3,5/28 mm	280 F	*Super grand angle 3,5/28 mm*	525 F
Télé objectif 2,8/135 mm	290 F	*Télé objectif 4,5/240 mm*	490 F

Liste des concessionnaires exclusifs PHOTO-PORST et documentation complète sur tous les autres matériels disponibles, gratuitement sur simple demande à : PHOTO-PORST (Service SV) 7 boulevard Haussmann, PARIS 9e

PERSONNE EN FRANCE NE PEUT ETRE MEILLEUR MARCHE QUE PHOTO-PORST

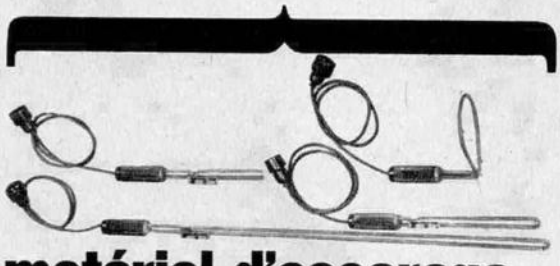
glaceuses à plaques

— Double face formats 27 x 38 à 51 x 62 cm (6 modèles) de 350 watts à 900 watts de 265 F. à 634 F.
— Mono face formats 27 x 38 à 51 x 62 cm (5 modèles) de 350 watts à 900 watts de 151 F. à 326 F.
— A moteur, simple face formats 20 x 25 à 27 x 38 (3 modèles) de 47 F. à 75 F.



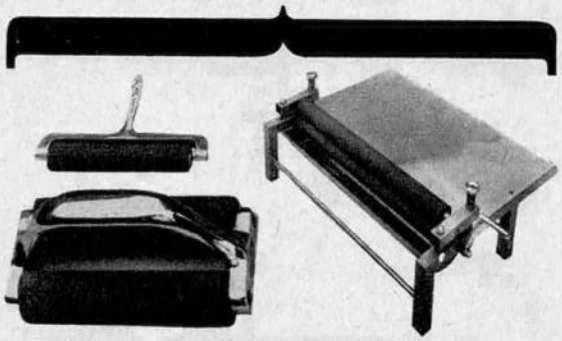
réchauffeurs de bains

Pour cuvettes : modèle Condé
étanche à résistance blindée 21 cm, 250 watts : 93 F.
Pour cuves verticales : nombreux modèles
cannes acier ou laiton 35 cm à 1,20 m - 400 watts à 1.200 watts.



matériel d'essorage

Rouleaux simples ou doubles, essoreuses à manivelles.



SPRINT-VITAU
3, 5 et 7 Av. des Deux Communes
94 - CHAMPIGNY S/MARNE
Tél. 472-22-91 et 87-23

OUVRAGE INFRA

MÉTÉOROLOGIE GÉNÉRALE ET MÉTÉOROLOGIE AÉRONAUTIQUE

Ce cours est le fruit d'une longue expérience de l'Enseignement de la Météorologie aux Élèves et aux personnels les plus divers de l'aviation, aussi bien navigant que non navigant. En particulier, il fut dispensé oralement et en substance, à l'École Nationale de l'Aviation Civile.

L'intention de l'INFRA en le diffusant exceptionnellement séparé de ses programmes de cours, est de permettre tout d'abord, de mieux promouvoir encore son enseignement en faisant connaître ses qualités auprès d'un Public plus vaste.

Également à l'occasion de ce numéro spécial de Science et Vie, l'École INFRA désire mettre à la disposition de tous ceux qui s'intéressent de près à la Météorologie, un ouvrage approfondi. Plus particulièrement aux diverses catégories d'élèves ou de personnels de l'Aéronautique, cet ouvrage permet d'acquérir les connaissances fondamentales, tant en météorologie générale qu'en météorologie aéronautique, nécessaires à l'exercice de la carrière qu'ils ont choisie.

L'assimilation du contenu de ce document très complet, permet notamment aux navigants, aux météorologistes et aux personnels de la navigation aérienne, d'exercer leur métier en toute connaissance de cause.

C'est ainsi par exemple, que de nombreux Candidats aux brevets de Pilote Professionnel de 1re Classe et de Pilote de Ligne y trouvent l'enseignement fondamental par excellence.

C'est le cas notamment de nombreux Pilotes déjà en place dans les diverses Compagnies Aériennes, Air-Inter par exemple.

Malgré son importance, ce cours n'a pas pour but de donner à ses lecteurs le même niveau de connaissances qu'aux météorologistes. Il devrait permettre à ceux qui l'utiliseront :

— de préparer les différents examens conduisant à l'obtention des diverses licences du personnel navigant et non navigant de l'aéronautique ;
— de mieux saisir le mécanisme et la très grande complexité des phénomènes météorologiques ;
— d'assimiler et d'utiliser le langage des météorologistes qui les renseigneront ou les conseilleront au cours de leur carrière.

Pour recevoir l'édition imprimée de cet ouvrage présenté sous forme d'un cours de plus de 500 pages, format 21 × 27, il suffit de remplir ou de recopier le Bon à découper ci-dessous et de le retourner accompagné de votre règlement à

infra
24, RUE JEAN-MERMOZ • PARIS 8e • Tél. : 225.74-65

BON

Je désire recevoir l'ouvrage « Météorologie Générale et Météorologie Aéronautique ». SVS - MTO. Pour couvrir tous frais, je vous adresse la somme de 98 F par Chèque postal ou bancaire ou mandat lettre ci-joint (1) au nom de INFRA, 24, rue Jean-Mermoz, PARIS (8e) - C.C.P. 417-46 PARIS.

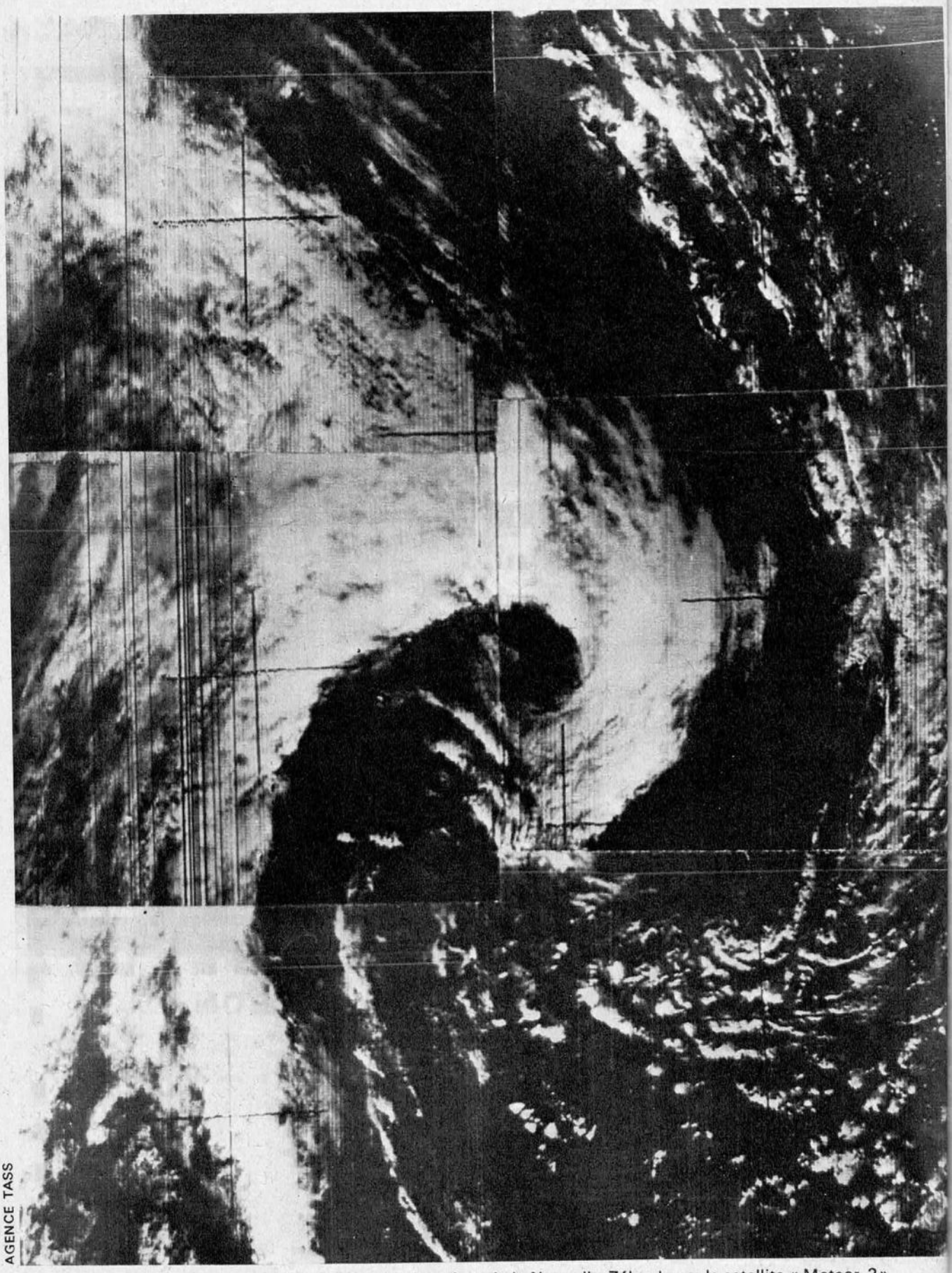
Mon nom .....

Mon adresse complète .....

.....

.....

(1) Rayer la mention inutile.



AGENCE TASS

Un grand cyclone, saisi en octobre 1969 près des côtes de la Nouvelle-Zélande par le satellite « Meteor 2 ».

L'atmosphère vue de l'Espace

Avant les premiers satellites météorologiques, apparus il y a dix ans, avant que l'homme lui-même ne s'arrache à son environnement immédiat pour aller contourner la Lune, l'humanité terrienne n'avait jamais vu, ou peut-être même imaginé, le vrai visage de sa planète.

La représentation géographique traditionnelle, sur carte ou sur sphère, donne l'image d'un modelé orographique figé, guère différent du faciès minéral de notre satellite naturel. La réalité, c'est, au-dessus des mers et des continents, une atmosphère constamment agitée, brassant, composant et décomposant la blancheur de ses formations nuageuses, comme les houles et les vagues à la surface de l'océan.

Pour connaître cette réalité, il eût fallu à l'observateur terrien quelque gigantesque rétroviseur. Or ce rétroviseur existe ; il n'est autre que la Lune elle-même. Dès 1928, le savant français Danjon avait noté que la partie de la Lune non directement éclairée par le Soleil bénéficiait d'une lumière résiduelle — la lumière cendrée — due à la réflexion du rayonnement solaire par la Terre. La photométrie de ce « clair de Terre » permettait d'évaluer la réflectivité propre de la Terre, ce qu'on nomme son *albedo*, qui est, comme on verra plus loin, essentiellement lié à sa couverture nuageuse. Les mesures de Danjon, reprises plus tard de manière directe par les satellites artificiels, devaient s'avérer étonnamment précises et d'un réel intérêt en météorologie.

La Lune est donc certainement le premier en date des satellites météorologiques. Elle a, d'ailleurs, de bonnes chances de conserver cette prérogative, puisque le Laboratoire International Lunaire (LIL) comportera un observatoire météorologique semi-permanent ou permanent.

C'est qu'en effet, la Lune constitue une admirable plate-forme de travail, très stable, capable de supporter des équipements très raffinés et les équipes de techniciens chargés de leur manipulation et de leur maintenance. Une plate-forme équipée de la sorte permettrait de surveiller à la fois la Terre, son atmosphère, et le Soleil. Cette source énergétique de la machine atmosphérique, d'intensité sensiblement constante mais avec des accès de fièvre, n'est certainement pas sans influence sur les événements terrestres, au moins dans le domaine météorologique.

Plaçons-nous donc par anticipation sur notre satellite naturel, ou, mieux peut-être, à bord de l'un des satellites artificiels que l'on installe désormais de façon courante à 36 000 km d'altitude sur l'équateur, en position stationnaire par rapport à notre globe, et observons ce qui se passe.

La planète bleue

La « planète bleue », c'est le nom donné à la Terre par les premiers astronautes. Vue de l'Espace, la Terre apparait entourée d'une auréole bleutée où l'on reconnaît immédiatement la présence d'une pellicule atmosphérique diffusant la lumière solaire.

Il n'est pas commode de définir l'épaisseur de cette pellicule. La pesanteur terrestre est responsable de la dilution progressive des molécules d'air avec l'altitude, ce qui se traduit, en termes de pression atmosphérique, par une décroissance exponentielle avec l'altitude. Cette loi altimétrique, due à Laplace, n'assigne pas de limite théorique au fluide atmosphérique. En réalité, la physique des milieux raréfiés présente des aspects multiples, et au-delà de l'atmosphère homogène (prolongement de notre atmosphère familière et justiciable des

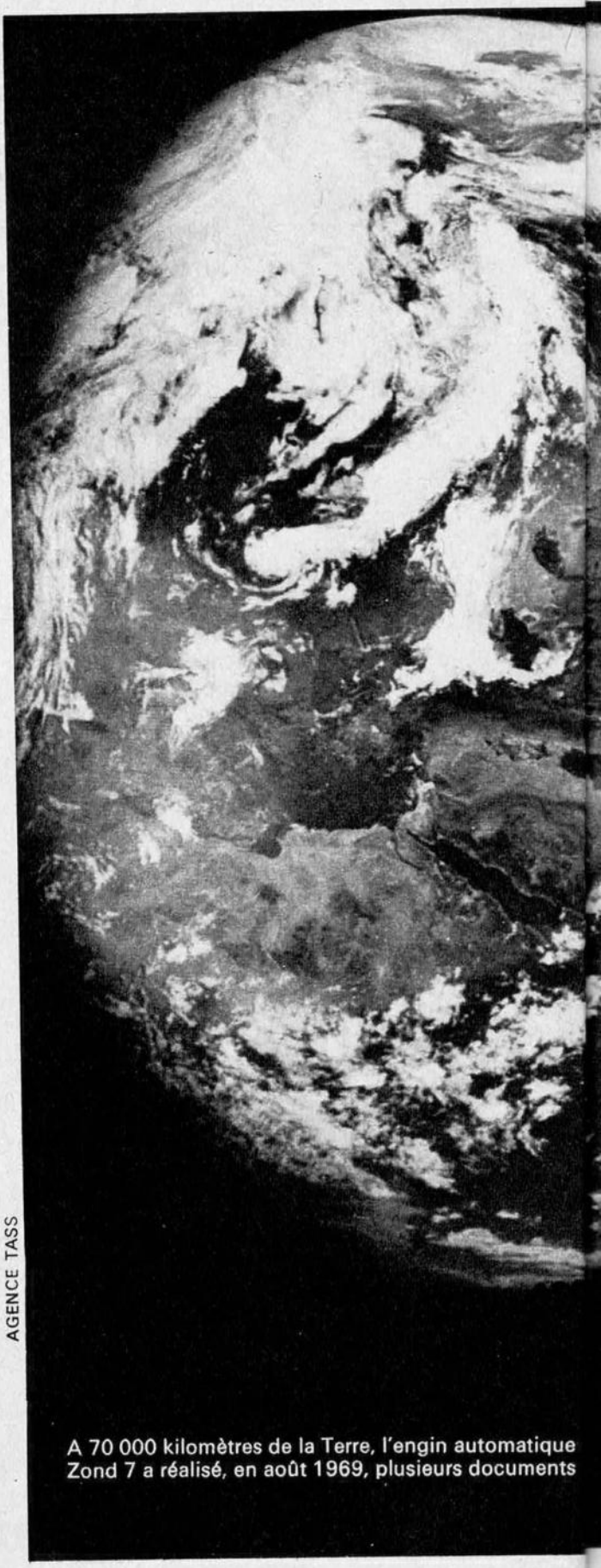
propriétés des gaz parfaits), se manifeste une atmosphère supérieure hétérogène (hétérosphère) dont les gaz subissent des processus photochimiques d'une réelle complexité. Entre les deux, une zone de transition relativement épaisse, dont le plancher se situe vers 80 km d'altitude.

Cette zone de transition sera, par définition, la frontière supérieure de l'atmosphère météorologique. On l'appelle *mésopause*. Elle constitue, en même temps, la région la plus froide de l'atmosphère élevée.

Plus bas, on rencontre successivement *mésosphère* et *stratosphère*, celle-ci étant parfois le siège (vers 50 km) de phénomènes de réchauffement. Plus bas encore, à partir de quelque vingt kilomètres, c'est l'atmosphère véritablement dense, la *stratosphère basse*, sensiblement isotherme. En-dessous de 10 km, on rencontre les nuages qui nous sont familiers : c'est le domaine de la *troposphère*.

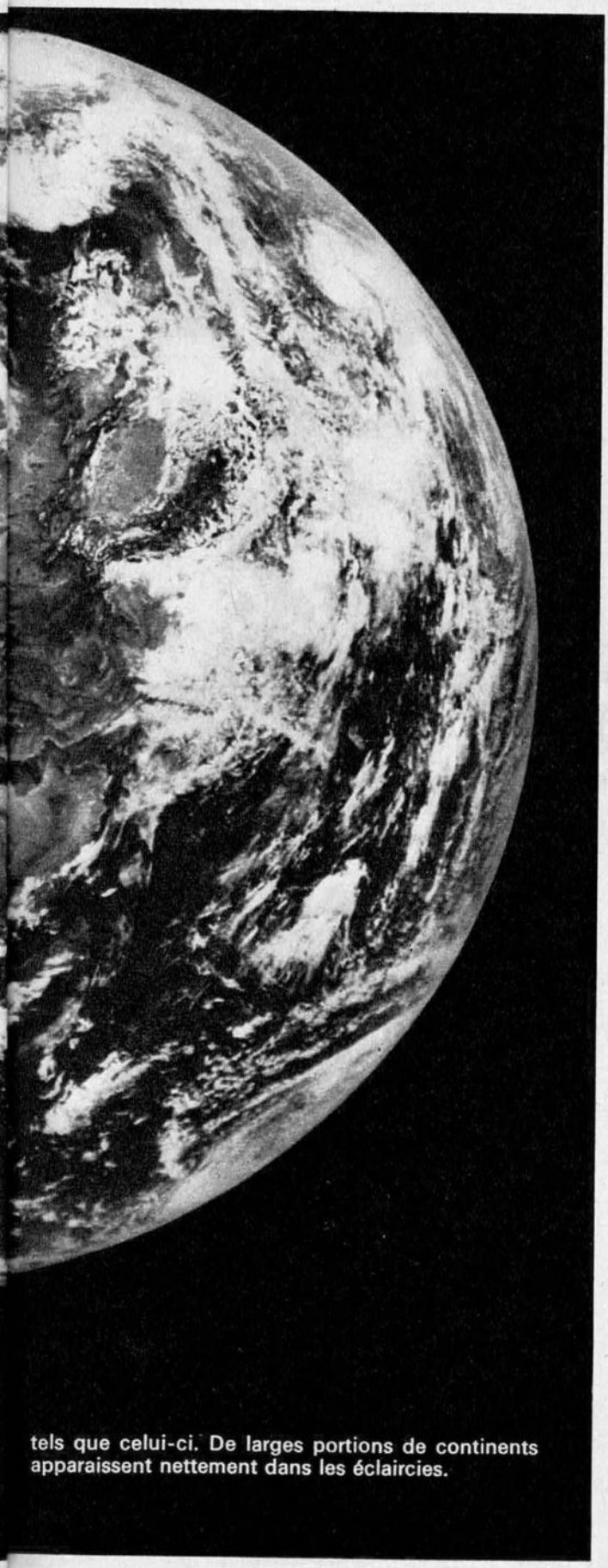
Il serait faux, cependant, de croire qu'il n'existe pas de nuages au-dessus de 10 km, mais ils sont toujours ténus et peu visibles du sol. Ils peuvent être constitués d'aérosols diffusants, révélés à l'observateur en satellite par les variations de luminosité de l'horizon terrestre. Il en existe, par exemple, vers 20 km d'altitude, dans la zone de calme stratosphérique, véritable Mer des Sargasses de l'atmosphère. On en voit aussi à des altitudes plus élevées, et jusqu'à la mésopause. Il s'agit alors des « nuages nocturnes lumineux », dont la composition est encore incertaine malgré certains prélèvements *in situ* opérés par des fusées.

Mais ce sont bien les nuages d'eau de la troposphère — les nuages de tous les jours — qui occupent l'essentiel de la scène atmosphérique. La Terre en est abondamment couverte, au total sur plus de la moitié de sa surface. A travers les éclaircies se dessinent des contours géographiques, côtes, lacs, chaînes de montagnes, étendues glacées. L'Océan, médiocre réflecteur, constitue un fond sombre sur lequel se détachent les masses nuageuses en mouvement continuel et apparemment anarchique. L'œil fait immédiatement la différence entre l'hémisphère d'été et l'hémisphère d'hiver, celui-ci connaissant une nébulosité plus forte. Mais d'autres différences apparaissent selon les latitudes. Notre observateur spatial, supposé doté d'une persistance rétinienne à l'échelle des jours, verrait se succéder, depuis l'équateur, des bandes de brillances alternées. D'abord une bande nuageuse équatoriale dense (le « pot-au-noir »), puis une bande intertropicale comportant de larges éclaircies (à quoi correspondent des déserts, tels le Sahara et l'Arabie), enfin une bande de latitudes tempérées et les hautes latitudes, où la nébulosité,



AGENCE TASS

A 70 000 kilomètres de la Terre, l'engin automatique Zond 7 a réalisé, en août 1969, plusieurs documents



tels que celui-ci. De larges portions de continents apparaissent nettement dans les éclaircies.

de densité variable, reste en moyenne assez forte.

Cette nébulosité fait l'essentiel de la blancheur de la banlieue terrestre et de sa réflectivité (d'où ce nom *d'albedo,* de *alba* blanche), et, par là, constitue un élément déterminant pour l'équilibre radiatif et thermique du globe.

Le filtre atmosphérique

Un rôle protecteur — anti-rayonnement, anti-thermique — est dévolu à la gaine atmosphérique terrestre, à ses différents niveaux.

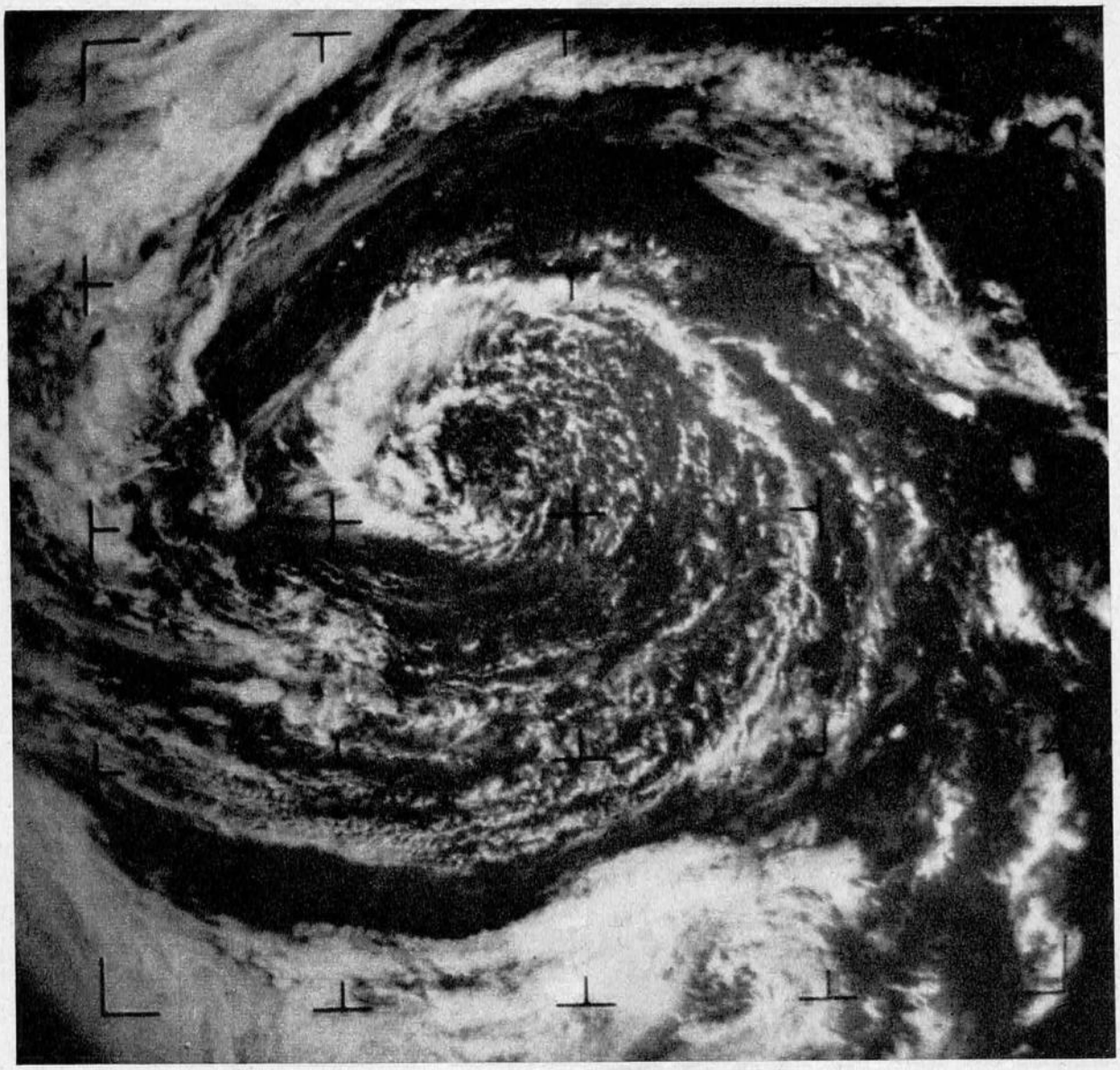
Ce sont d'abord les niveaux les plus élevés, où l'atmosphère reçoit l'impact des flux solaires et cosmiques. Les particules énergétiques réagissent dans l'atmosphère supérieure pour donner des effets variés. Dans les régions polaires, ce sont notamment les « aurores », associées à un piégeage de particules par le champ magnétique terrestre. On soupçonne, à ces niveaux, un couplage thermique avec des événements de plus basse altitude, comme le tourbillon stratosphérique circumpolaire.

Le rôle de barrière ou d'écran sélectif de l'atmosphère supérieure est particulièrement mis en évidence par la couche d'ozone qui, en stratosphère moyenne, s'oppose à la pénétration du rayonnement ultraviolet qu'elle rétrodiffuse et absorbe. On connaît la nocivité de l'ultraviolet sur la matière vivante.

Le rayonnement solaire se trouve ainsi partiellement filtré lorsqu'il atteint l'atmosphère dense, qu'il traverse pour délivrer la plus grande partie de son énergie à la surface terrestre. Une partie de cette énergie est en réalité dilapidée par les nuages en vertu de leur pouvoir réflecteur. Ce pouvoir réflecteur explique leur rôle de régulation thermique.

Si, la couverture nuageuse diminuait, le rayonnement solaire tombant sur la surface du sol se renforcerait, favorisant les échanges convectifs et, par suite, la création de nouveaux nuages qui compenseraient le déficit antérieur. L'effet inverse serait constaté en cas d'augmentation de la couche nuageuse. Ainsi l'albedo global se maintient-il sensiblement constant, du moins dans un certain état d'équilibre statistique. Il n'est pas exclu que des variations significatives soient intervenues au cours des temps, et ceci expliquerait les grandes alternances climatiques de la préhistoire, que la pétrographie nous permet aujourd'hui de reconnaître.

Bilan radiatif et bilan thermique sont étroitement liés. La surface terrestre, échauffée par le rayonnement solaire, rayonne à son tour en infrarouge vers l'espace, et son rayonnement subit l'absorption atmosphérique, spécialement intense dans ce domaine spectral. Le processus est ici particulièrement complexe, car l'ab-



A quelque 1 100 km au-dessus d'une zone dépressionnaire qui couvrait le Nord de l'Atlantique, Nimbus 2 a pu transmettre cette image de formations nuageuses disposées en enroulement cyclonique.

sorbant atmosphérique, en phase gazeuse ou en phase liquide (les nuages), restitue, vers le haut et vers le bas, une part de l'énergie captée. Au niveau du sol, le bilan apparaîtra positif ou négatif selon la situation météorologique. On peut s'en rendre compte facilement avec les gelées matinales, à l'occasion d'une nuit claire, transparente au rayonnement.
Finalement, et toutes choses considérées en valeur moyenne, la constance du bilan radiatif Terre-Espace sur un intervalle de temps suffisamment long assure une certaine constance du climat thermique. De fait, les variations climatiques observables à notre échelle de temps (statistique des températures, régression des glaces) ne donnent pas, jusqu'à aujourd'hui, d'indications convergentes dans le sens d'un réchauffement ou d'un refroidissement lent de notre globe.

Circulation générale et phénomènes liés à la latitude

L'atmosphère n'est pas un milieu inerte, elle vit, elle se transforme continuellement, elle est agitée partout et à tous moments de mouvements en apparence infiniment variés.
Cette variabilité — cette turbulence — des conditions atmosphériques se révèle à l'observateur terrestre par ces manifestations directement sensibles que sont les météores. On

connaît bien ce mot dans son acceptation astronomique ; il appartient en réalité, par l'étymologie, au vocabulaire... météorologique. Le vent, qui est le déplacement de l'air, les nuages (et la pluie), qui sont la forme condensée de l'eau atmosphérique, constituent des météores et en même temps des indicateurs précieux du comportement de l'atmosphère. Les nuages, en particulier, sont autant de balises marquant les grands courants horizontaux (qui les entraînent) et verticaux (qui les soutiennent contre la pesanteur).

C'est dans le cas des nuages que l'on jugera d'abord de l'importance de la notion d'échelle en météorologie. Le nuage individuel, tel le petit cumulus de beau temps (bien reconnaissable à sa forme en chou-fleur) a des dimensions modestes, mesurables en centaines de mètres ou en kilomètres. Sa vie propre, assez autonome mais courte, est chiffrable en dizaine de minutes ou en heures. Par contre, la formation nuageuse du type planétaire, révélée à l'observatoire spatial, occupe une bande de latitudes de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres. Son évolution dure des heures et des jours.

Le mouvement le plus général de l'atmosphère se présente finalement comme une turbulence ou, plus exactement, comme une somme de turbulences à plusieurs échelles de dimension et de temps. A chacune de ces échelles correspond une organisation statistique, des liaisons d'une certaine intensité et d'une certaine durée, et finalement la dissipation d'une fraction de l'énergie disponible.

La plus grande de ces échelles — l'échelle planétaire — est souvent appelée *synoptique ;* on entend par là qu'elle correspond à la vision instantanée (synoptique) de l'observateur spatial. Les mouvements de l'échelle planétaire constituent, au premier degré, la « circulation générale » de l'atmosphère.

Revenons à notre observatoire satellisé pour en fixer l'image. Des aspects très différents se présentent suivant les latitudes.

Aux latitudes intertropicales, cette circulation apparaît très compartimentée. Des vents saisonniers, comme la mousson, affectent passagèrement de vastes zones et y déterminant le « temps ». On reconnaît parfois des « cellules », vivant d'une vie semi-autonome et favorisant en certains cas les échanges inter-hémisphères. L'ensoleillement, sous incidence zénithale, et l'humidité se combinent pour créer de puissants courants de convection, favorisant le développement de nuages orageux aux vastes dimensions. Parfois groupés en lignes de grains, ces nuages dérivent généralement d'Est en Ouest, drossés par les vents d'Est qui règnent en altitude. Certains phénomènes tourbillonnaires peuvent atteindre des intensités considérables et acquérir une identité propre, se conservant sur de longs trajets : ce sont les cyclones tropicaux. Au total, l'activité météorologique est souvent très vive mais, en quelque manière, brouillonne et sporadique.

Il en va tout autrement aux latitudes tempérées et aux hautes latitudes. Ici la circulation des masses nuageuses est continue, généralement d'Ouest en Est ; elle accompagne la rotation du globe. Cette ronde circumterrestre est particulièrement marquée aux latitudes polaires, où s'élabore une partie des grandes perturbations météorologiques. On donne ce nom à des arrangements de nuages de grande dimension, associés à des manifestations de mauvais temps : vents, nuages et pluies.

Deux types de perturbations

Les perturbations se suivent et s'enchaînent par « trains » ou « familles » avec une périodicité sensible sur des durées de l'ordre de la semaine. Cette périodicité se traduit elle-même par l'alternance de « types de temps » : à l'avant, relativement tiède, très nuageux à couvert, bruineux ou pluvieux ; à l'arrière, plus froid et variable en nébulosité, avec averses éparses.

Une sorte de fil d'Ariane aérologique paraît guider les trains de perturbations. En altitude, et plus précisément au sommet de la troposphère, se manifestent les courants-jets, sorte de « tubes de vents » violents, véhiculant une partie importante de l'énergie cinétique atmosphérique. Le courant-jet est redoutable pour l'aéronautique, tant par sa vitesse (jusqu'à 300 km/h) que par la turbulence qui lui est localement associée.

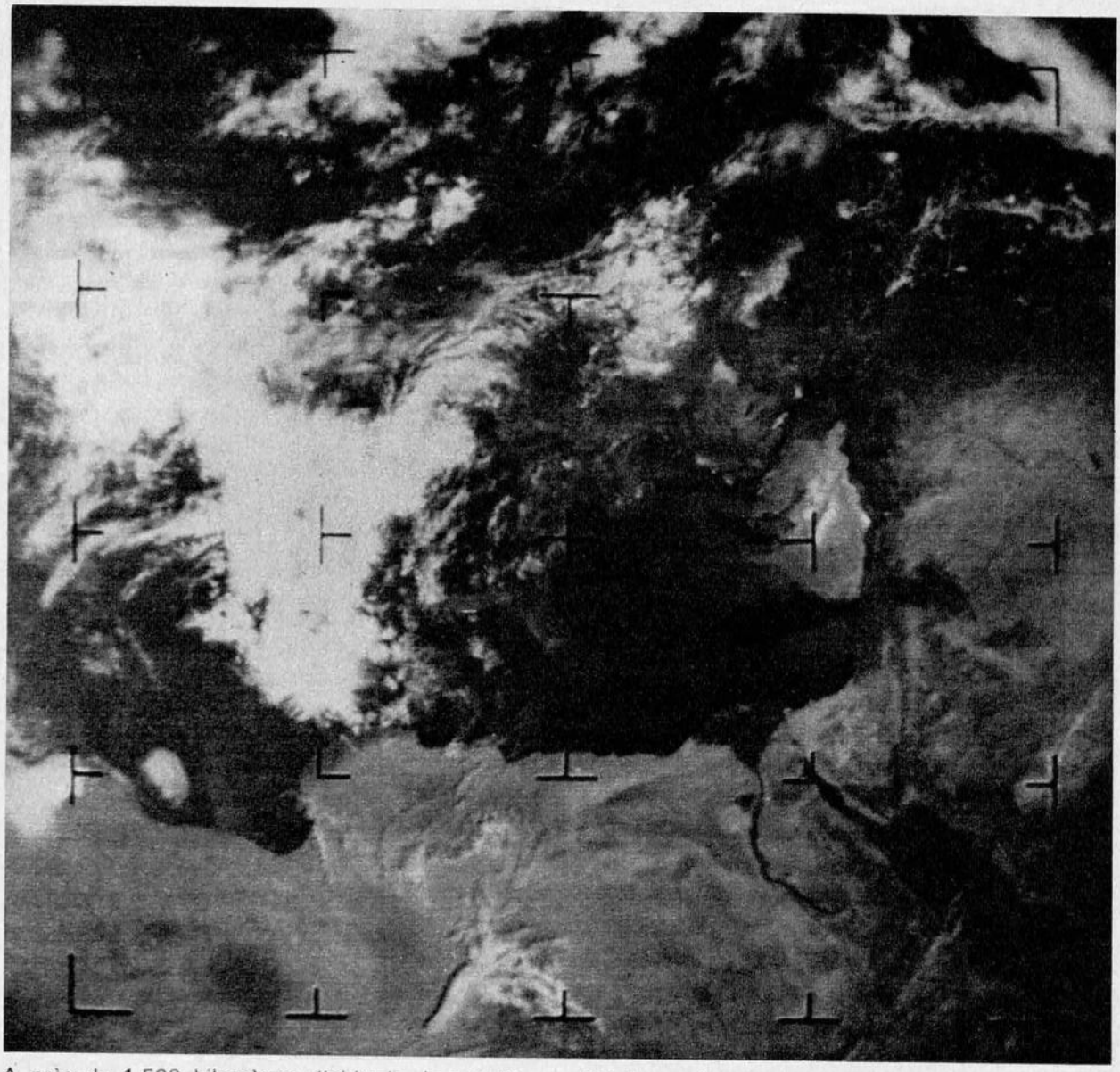
Les perturbations — événement superficiel, éruption cutanée de l'atmosphère — nous donnent deux voies d'accès à sa mécanique interne. On constate d'abord que l'élément générateur de la perturbation est, dans la majorité des cas, un phénomène tourbillonnaire, le « vortex ». De volume plus important que le cyclone tropical, mais en général moins redoutable, le vortex des latitudes tempérées représente la figure-clé de la circulation atmosphérique. La circulation des masses nuageuses, image de la circulation des masses d'air elle-même, se fait autour des vortex et en liaison avec eux, c'est-à-dire avec leur propre déplacement.

Au vortex est associée une dépression barométrique, dont on a reconnu depuis longtemps qu'elle était annonciatrice de mauvais temps, voire de tempête. En termes de cinétique, lui est associé le tourbillon ou rotationnel, concept mathématique traduisant une certaine déviation tourbillonnaire de l'écoulement. La « conservation du tourbillon » constitue un guide

précieux pour l'analyse mathématique de l'évolution des champs.
Un deuxième aspect des perturbations est le conflit des masses d'air. On a reconnu que la naissance du vortex tempéré se trouvait liée, en général, à un conflit de masses d'air thermiquement différentes. L'origine de ce conflit relève du fonctionnement de la machine atmosphérique soumise à un apport d'énergie solaire qui varie suivant la hauteur du Soleil, c'est-à-dire suivant la latitude. Ainsi se crée un gradient latitudinal allant de pair avec une circulation normalement zonale. Mais à ce schéma initial s'ajoutent des modifications dues à l'inégale répartition des océans et des continents. Celle-ci entraîne des effets méridiens qui se traduisent, en particulier, par la « remontée » de masses d'air chaud tropical et surtout par la « descente » de masses d'air froid polaire. Des conflits de masses d'air froid et chaud naissent les vortex mais aussi certains clivages où les masses d'air se rencontrent suivant un biseau faiblement incliné sur l'horizontale. Ce clivage air chaud/air froid porte le nom de front froid, occlusion, etc. suivant sa configuration géométrique.
Les fronts représentent une singularité météorologique importante ; ils sont à la fois zone de discontinuité (de température, de vent, etc.) et zone de concentration des plus mauvaises conditions atmosphériques. Les fronts froids, en particulier, pour lesquels l'air chaud antérieur est constamment repoussé vers l'Est et le Sud par l'air froid postérieur, constituent l'épine dorsale des perturbations. Ils ont la propriété de se reproduire par « ondulations » successives, chaque ondulation donnant naissance à un vortex et à un nouveau front froid, qui continue la « famille » des perturbations. Ceci est l'illustration d'un fait physique important, selon lequel, sur un intervalle de temps suffisamment court, l'atmosphère pilote sa propre évolution. Elle est alors justiciable de méthodes mathématiques d'analyse et, par conséquent, de prévision.

Les modèles prévisionnels

Considérée sous l'angle de la circulation générale, la météorologie est une aérodynamique. Le problème qui se pose est, en effet, un problème particulier d'écoulement dans lequel une pellicule fluide est astreinte à se mouvoir autour d'une sphère pleine, de rugosité variable, en rotation uniforme autour d'un axe. La pesanteur terrestre intervient comme une liaison essentielle ; on peut définir des conditions aux limites supérieures (échanges radiatifs avec l'Espace) et inférieure (échanges avec la surface terrestre).
Pour traiter un problème de cette dimension, la météorologie dynamique dispose de deux voies étroitement complémentaires et finalement convergentes : la voie « expérimentale », c'est-à-dire l'observation du fait atmosphérique réel, et la voie théorique, c'est-à-dire l'analyse par les méthodes mathématiques de la physique.
Comme en toute science physique, l'observation joue un double rôle de guidage, d'abord pour le choix entre de multiples solutions analytiques possibles, ensuite pour fournir les coefficients numériques nécessaires à une simulation globale.
On en vient finalement à définir un modèle mathématique représentant l'atmosphère sous une forme « discrétisée », des particules d'une certaine dimension étant figurées par des paramètres d'état et de mouvement aux points-mailles d'une grille géographique régulière. Ce modèle mathématique entre lui-même dans un modèle d'évolution dans le temps que l'on baptise, en fonction de sa destination, *modèle prévisionnel.*
La construction d'un tel modèle repose sur un système classique d'équations primitives dont la formulation remonte au milieu du XIX^{e} siècle (Helmholtz). Mais la complexité des calculs est redoutable et fait appel aux techniques mathématiques les plus avancées et aux ordinateurs les plus puissants.
La difficulté mathématique vient essentiellement du problème de « filtrage » des données. La solution générale fait, en effet, apparaître des ondes de diverses longueurs, dont certaines — les ondes de petite longueur — ne peuvent être acceptées. Seules sont significatives du point de vue de la circulation générale les ondes longues apparentées à celles que constate l'observateur spatial, et qu'on nomme souvent ondes de Rossby.
On a longtemps employé une méthode de filtrage dite « méthode géostrophique », liant la force du vent et le gradient horizontal de pression dans une configuration simplifiée. Cette approximation fait intervenir le terme improprement appelé « force de Coriolis » dans le mouvement relatif de l'atmosphère sur la sphère terrestre. Elle est utilisée en pratique courante pour le calcul des vents de la zone tempérée, où le paramètre de Coriolis intervient effectivement. Elle perd sa signification dans les régions tropicales, lorsque ce paramètre s'annule. La méthode géostrophique s'est révélée efficace, peut-être trop même, et on cherche aujourd'hui un filtrage moins sévère à partir des équations primitives, en modèle dit « barocline » à plusieurs niveaux.
Il faut introduire ici la notion de stratification verticale de l'atmosphère. Dans la troposphère, la température décroît avec l'altitude. Ce gradient est important à considérer pour la stabi-



A près de 1 500 kilomètres d'altitude, le satellite météorologique ESSA 2 a capté des images de la Méditerranée orientale. Une vaste zone de perturbation recouvrait l'Europe centrale et les Balkans.

lité de l'atmosphère, c'est-à-dire la capacité d'une particule atmosphérique à se déplacer par rapport à son niveau d'origine et à s'élever « par ses propres moyens », sous l'effet d'une différence de température. Ainsi s'introduit un couplage entre couches atmosphériques superposées.

Le modèle dit « barotrope » représente toute l'atmosphère par un seul niveau, à mi-hauteur. Le modèle « barocline », plus raffiné, tient compte de ce que la distribution des températures ne dépend pas uniquement de celle des pressions. Il représente l'atmosphère avec plusieurs niveaux et rend mieux compte, par exemple, de l'évolution en ce qui concerne la naissance du tourbillon (cyclogénèse).

Une analyse complète ferait intervenir le cycle de l'eau (évaporation, condensation, précipitation), qui développe des énergies considérables et intervient dans toute l'économie du système atmosphérique. Ainsi, on peut disposer d'un modèle d'évolution plus ou moins perfectionné.

Ce système est en principe capable de fonctionner à partir des conditions observées du moment. Au fil du temps, le modèle s'éloignera de la réalité et il faudra le recaler sur les données les plus actuelles, puis le « relancer ». C'est une procédure de pas à pas. Un pas qui peut d'ailleurs être très variable, se chiffrant en heures ou en jours.

La portée pratique des prévisions numériques

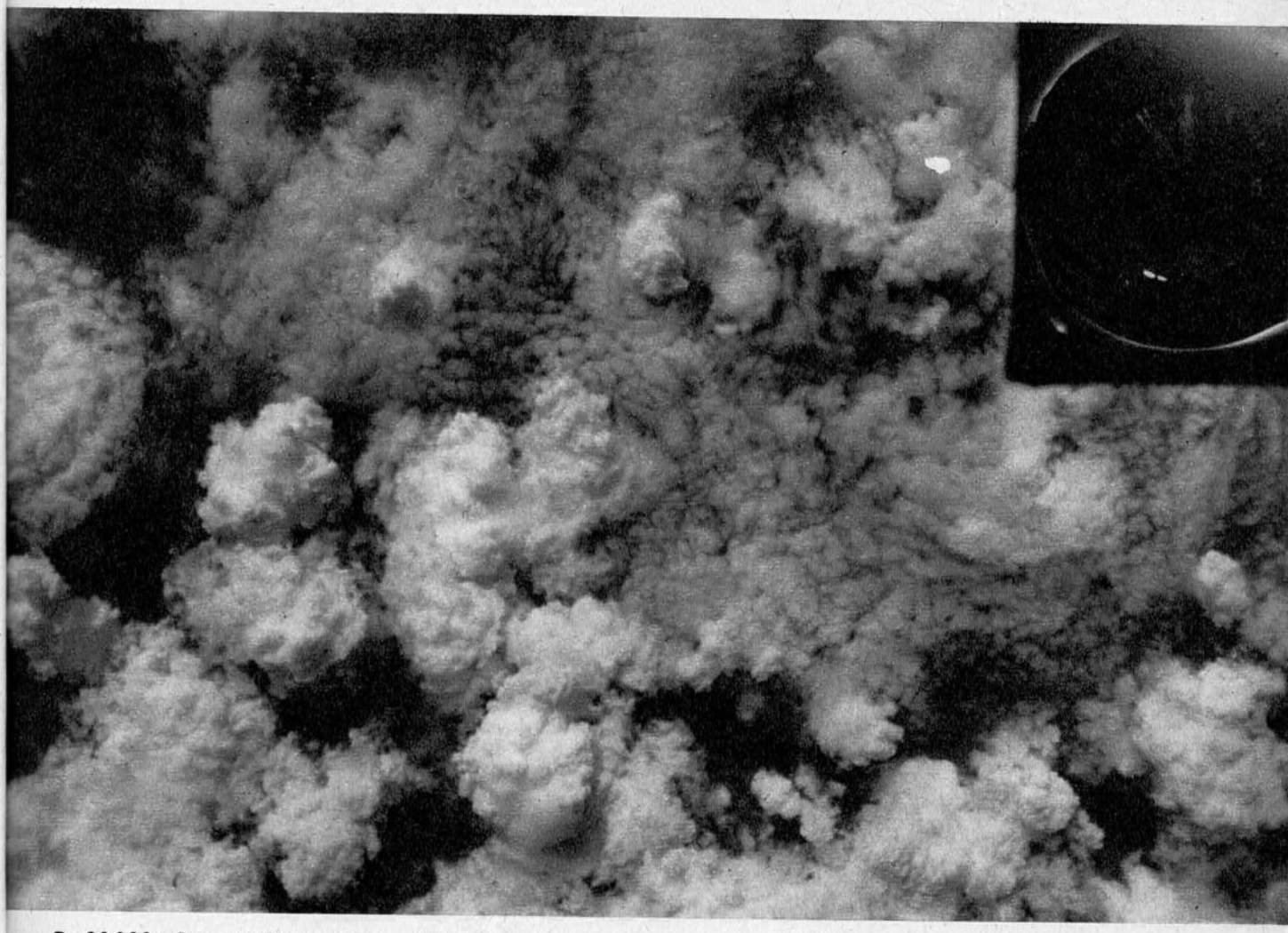
est aujourd'hui de 3 à 5 jours, la précision diminuant, bien entendu, avec l'échéance.
Si l'on ne peut aller plus loin, c'est en particulier que la « discrétisation » par points de grille introduit des erreurs et schématise le « bruit » des événements d'échelle inférieure sous une forme éventuellement peu réaliste. L'introduction des conditions initiales brutes, non corrigées, dans le modèle, peut elle-même engendrer des perturbations parasites. Enfin, le travail d'analyse et de prévision se fonde sur une quantité d'observations nettement insuffisante.

Un réseau trop peu dense

L'Organisation Météorologique Mondiale (1) estime que 90 % de la surface du globe sont encore insuffisamment couverts du point de vue de l'observation.
Le réseau classique de stations météorologiques n'est pas négligeable : il groupe 8 000 points de mesures, dont 500 environ sont capables d'effectuer le sondage vertical de l'atmosphère, dit « radiosondage ». Il convient de citer aussi quelques centaines de postes météorologiques radar qui « balaient » des régions entières pour y déceler les pluies et les orages.
Evidemment, la densité de ces observations est loin d'être suffisante. D'abord, parce que la variabilité des conditions de surface (et, dans une moindre mesure, des conditions d'altitude) imposent un quadrillage très serré, avec des équidistances optimales de l'ordre de 100 km. Ensuite, parce que les stations existantes sont essentiellement installées dans les régions à fort développement industriel, comme l'Europe et les Etats-Unis. D'énormes lacunes subsistent dans les pays en voie de développement — Afrique, Asie, Amérique du Sud — et surtout dans les zones désertiques, les jungles, les régions de haute montagne et les solitudes glacées des pôles. Plus encore, la surface des océans (qui représente les deux-tiers de la superficie du globe) ne comporte que quelques stations insulaires ou à bord des navires météorologiques stationnaires que les nations maritimes entretiennent à grands frais au bénéfice de la communauté internationale. Il faudrait encore évoquer les difficultés géopolitiques qui peuvent entretenir des disparités entre les instruments de mesures, donc entre les mesures elles-mêmes, ou même interdire l'accès au renseignement météorologique sur de vastes zones continentales.

(1) Les procédures internationales en météorologie sont coordonnées par cette organisation, siégeant à Genève, et qui est probablement l'une des plus anciennes organisation internationales (elle fut fondée dans la deuxième moitié du XIX^e siècle).

On voit ainsi se dessiner l'intérêt du satellite comme moyen d'investigation. Obtenir de la scène atmosphérique une vue globale, c'est-à-dire, étymologiquement, étendue à toute la planète, et, en même temps, permanente ou quasi-permanente, tel est, en effet, l'apanage du satellite. En plus, en ignorant les difficultés géopolitiques, le satellite ramène toutes les observations à un standard unique — le sien propre — et en assure la cohérence aux échelles de dimensions et de temps désirées. Enfin, il peut collecter et distribuer les informations dans les délais les plus courts. Toutes ces possibilités sont, en météorologie, proprement révolutionnaires.
On reviendra dans un autre chapitre sur les satellites. Il suffit de dire ici que les satellites météorologiques utilisent à la fois les orbites basses quasi-polaires et les orbites équatoriales élevées qui permettent la stationnarité par rapport à telle région du globe, pour assurer la surveillance complète de notre planète.
Une premier type de satellite météo sera qualifié de radiométrique ; il s'agit essentiellement d'interpréter les rayonnements transmis par l'atmosphère (ultraviolet, visible, infrarouge, millimétrique) et de les transcrire en termes météorologiques (par exemple, nuages ou températures). Cette fonction sensorielle n'est pas différente de celle de l'œil humain, avec une étendue spectrale et une précision photométrique largement améliorées. Cependant, il n'est pas possible de sonder ainsi à distance la plus extrême couche-limite, celle qui constitue le véritable interface Terre-Atmosphère. On ne sait pas non plus, par cette méthode, mesurer les vents qui règnent dans l'épaisseur atmosphérique. Il faut alors s'adresser à des plates-formes *in situ*, immergées dans le milieu atmosphérique. Ces plates-formes seront des stations terrestres ou maritimes et surtout des bouées ou des ballons plafonnants. Elles communiqueront sur demande leurs informations au satellite, qui deviendra de la sorte simple collecteur de données et relais hertzien en direction des centres d'analyse. Cette fonction correspond au deuxième type de satellite.
On voit aussi apparaître de nouveaux véhicules aériens dérivés du ballon, capables d'opérer — dans la durée — à des altitudes stratosphériques et de réaliser ainsi observation et collecte-relais de données à la manière du véhicule spatial, mais sur un domaine évidemment plus limité. Travaillant à une échelle plus fine et de manière plus permanente que le satellite, ces véhicules méritent sans doute l'appellation de « subsatellites » qui a été proposée pour eux. Un projet de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et de la Météorologie Nationale (projet COLOMBE/ESSOR) est consacré à leur développement.



De 30 000 mètres d'altitude, l'aspect d'une formation orageuse en cours de développement au-dessus de la France.

Vers un effort concerté

Au cours de ce chapitre, l'accent a été mis sur deux outils nouveaux entrés au service de la Météorologie : le calculateur électronique et le satellite. Leur mise en œuvre demande, pour atteindre à la pleine efficacité, un effort technique et financier que l'on peut difficilement consentir à l'échelle nationale. Seule une coopération internationale peut faire naître les calculateurs géants et ultrarapides capables de digérer un flot croissant de données et de faire « tourner » les modèles de plus en plus élaborés que l'on met au point. La mise sur pied des réseaux de satellites de surveillance, avec leurs multiples fonctions, ne se conçoit guère non plus sans un effort concerté.

D'ailleurs, l'atmosphère n'est-elle pas, par essence, internationale et n'ignore-t-elle pas les frontières ? L'événement météorologique survenu en un point retentit, d'une manière ou de l'autre, en tous les autres points. La communauté d'intérêt au plan international dans le domaine de la météorologie est ainsi évident. L'Organisation Météorologique Mondiale a tenu compte de ces caractères pour dresser des plans d'un système international, baptisé VMM (Veille Météorologique Mondiale) ou, en anglais, WWW (World Weather Watch), regroupant en trois centres mondiaux : Washington et Moscou pour l'hémisphère Nord, Melbourne pour l'hémisphère Sud, les fonctions de collecte, analyse et diffusion des données. Des Centres Régionaux sous-traiteront, à leur niveau, une partie de cet immense travail. Pour le préparer, on prévoit un programme de recherches globales, connu sous le nom de GARP (Global Atmospheric Research Program). La VMM devrait disposer d'un réseau complet de satellites, et notamment de quatre satellites géostationnaires placés en ceinture équatoriale autour du globe. La France pourrait s'associer à un tel réseau (projet METEOSAT).

Ces événements, essentiels pour l'avenir de la météorologie, prendront place dans la décennie qui commence.

A. VILLEVIEILLE

COMPRENDRE L'ATMOSPHÈRE

Le déroulement des manifestations atmosphériques, dès que celles-ci prennent quelque ampleur, a toujours inquiété les humains, soit par crainte pour leurs biens, individuels ou collectifs, et éventuellement pour leur vie, soit simplement par une attitude psychologique irraisonnée. Il est dans la nature humaine d'imaginer des causes, rationnelles ou irrationnelles, à des phénomènes qui l'affectent si directement.

La mentalité magique primitive plaça d'une façon toute naturelle l'atmosphère sous obédience divine. C'est ainsi que la résidence des dieux les plus puissants fut toujours située dans les cieux. Cette interprétation devait régresser au cours des temps et l'explication des phénomènes atmosphériques se chercher de plus en plus selon les normes générales de l'explication scientifique.

L'explication scientifique moderne n'a pas la prétention de saisir l'ultime réalité des phénomènes. Elle dépasse cependant la simple explication technique, telle qu'elle est couramment employée, par exemple, pour l'information du public sur l'évolution météorologique. Elle identifie certains éléments de la réalité concrète à des concepts abstraits doués de propriétés mathématiques et reliés entre eux selon des lois s'appliquant de façon universelle à l'ensemble du monde physique. C'est là l'objet des théories physiques.

Comme il arrive souvent dans les sciences, une seule théorie ne peut prendre en compte l'ensemble des phénomènes météorologiques. Telle construction théorique fondée sur des hypothèses simples peut interpréter une classe d'expériences ou d'observations relatives à l'atmosphère, tandis que telle autre, fondée sur des hypothèses en partie contradictoires, en interprétera une autre. Bien que ce soit là le cheminement habituel de la pensée scientifique, cette attitude est souvent cause d'incompréhensions dans les problèmes de la physique atmosphérique.

Une mince pellicule

L'idée la plus simple pour comprendre l'atmosphère consiste à l'imaginer au repos, ou plus précisément comme un fluide obéissant à la pesanteur et soumis aux lois de la statique. On rend compte ainsi d'une pression atmosphérique dont on comprend la décroissance avec l'altitude. On peut même imaginer que cette atmosphère est homogène et présente partout la même densité. Une telle hypothèse, qui est certes invraisemblable, permet cependant de rendre compte d'une classe importante de phénomènes. Une théorie efficace de prévision du temps, la théorie du « modèle barotrope », est fondée sur un schéma aussi élémentaire.

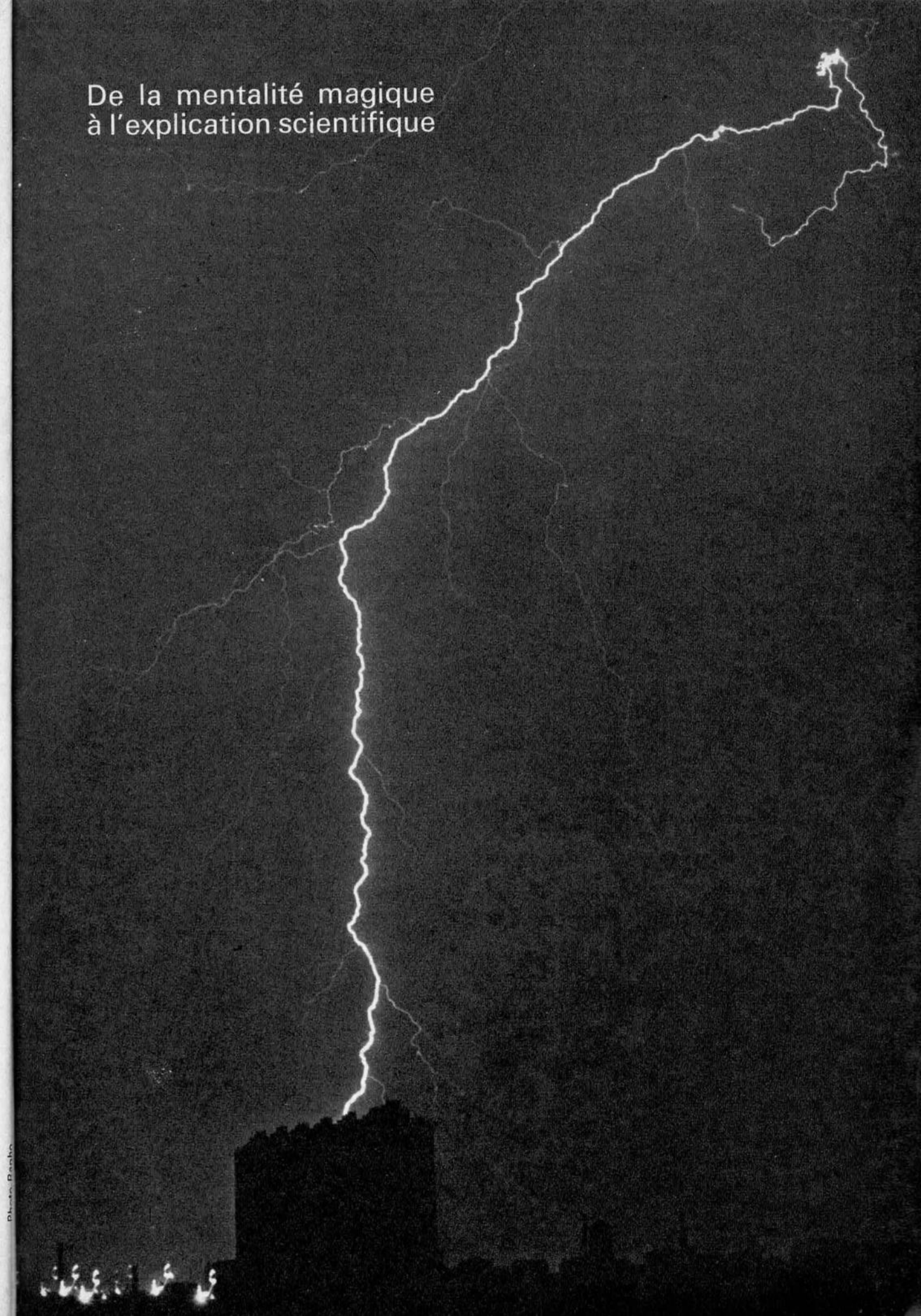
Avec une masse de 5 300 millions de mégatonnes, l'atmosphère ne représente qu'un peu moins du millionième de la masse de notre planète. On sait que cette masse atmosphérique est répartie à peu près également sur tous les points du globe à raison de 10 tonnes environ par mètre carré ; les fluctuations maximales représentent à peine 10 %.

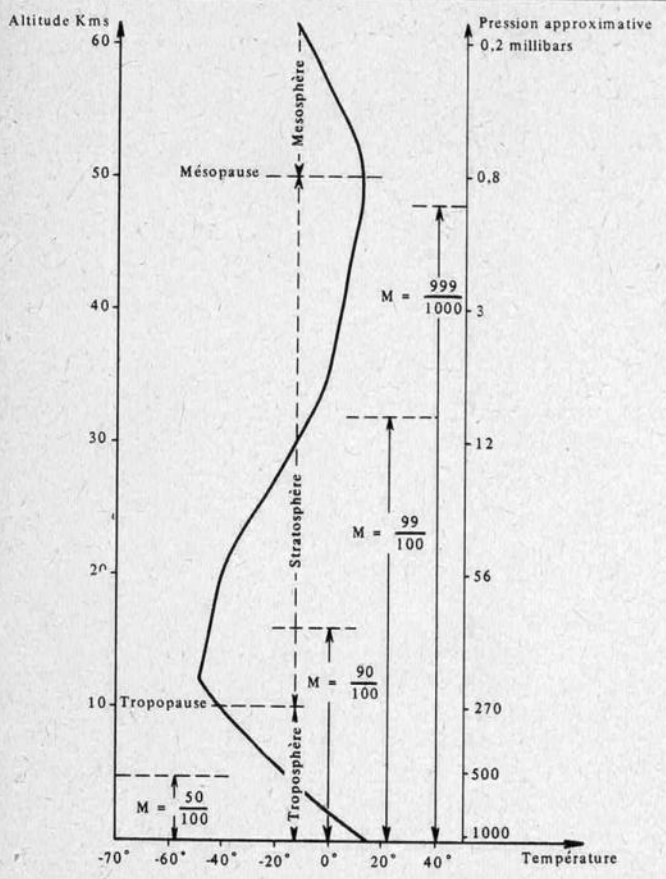
L'atmosphère posséderait une épaisseur de 8,5 km environ si ses propriétés ne variaient pas avec l'altitude. Comparant cette épaisseur au rayon moyen de la terre, 6 370 km, nous voyons que, dans l'approximation faite, l'atmosphère peut être considérée comme une pellicule extrêmement mince. Sur un globe terrestre ayant le diamètre usuel de 32 cm elle se présenterait comme un film de 2 à 3 dixièmes de millimètres.

La surface d'une telle pellicule peut être affectée par des oscillations comparables à une houle en eau peu profonde. Ces oscillations engendrent à la base de la pellicule des variations de pression de caractère ondulatoire. On constate de telles oscillations dans l'atmosphère et les vitesses de propagation correspondent à celles que l'on peut calculer avec un modèle de représentation physique aussi simple.

Par contre, si nous voulons interpréter d'une façon plus correcte les variations des propriétés avec l'altitude, nous devons abandonner une conception aussi élémentaire et nous poser des questions sur les variations de la densité avec l'altitude. Celle-ci est conditionnée par la pression et la température. La pression est créée par le poids de l'atmosphère elle-même et la température est régie par une physique plus complexe qui fait intervenir le rayonnement. Retenons seulement pour le moment l'idée élémentaire suivante : la température

De la mentalité magique à l'explication scientifique





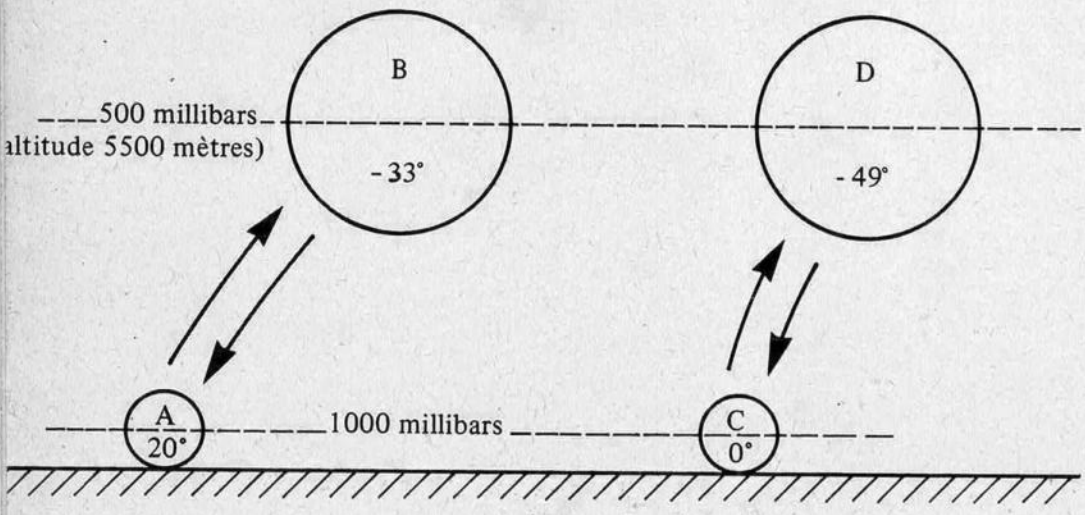
La répartition des températures en altitude définit trois régions : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, séparées par des zones de transition, la tropopause et la mésopause. Quant à la pression, elle décroît très rapidement, et la pression 500 millibars est atteinte vers 5 km d'altitude seulement.

d'une planète, et par conséquent celle de son atmosphère, est d'autant plus élevée que la planète est plus proche du Soleil.

La répartition de la température avec l'altitude est aussi un facteur très important. Si la température décroissait constamment et régulièrement avec l'altitude, nous aboutirions à un résultat analogue à celui rencontré pour une pellicule homogène. L'atmosphère aurait une épaisseur limitée, la limite étant fixée par l'altitude à laquelle nous atteindrions le zéro absolu. Pour une décroissance de 0,7° par 100 m, l'épaisseur serait de 40 km, c'est-à-dire cinq fois plus que celle de la pellicule homogène. Ceci caractérise toujours un film mince de 1 mm à l'échelle du globe de 32 cm de diamètre.

C'est bien d'un tel ordre de grandeur que la température décroît jusqu'à des altitudes de 10 à 20 km. Plus haut, cependant, cette décroissance s'annule et même s'inverse. Dans de telles conditions on peut montrer que l'atmosphère doit être illimitée.

Toutefois, la densité devient démesurément faible et les molécules d'air très disséminées dans l'espace. Au voisinage du sol l'espacement moyen des molécules est de l'ordre du dixième de micron ; il devient de l'ordre du décimètre à 100 km d'altitude. Pour fixer un ordre de grandeur de la décroissance avec l'altitude, nous dirons que la masse atmosphérique surmontant un observateur est approximativement divisée par 10 à chaque élévation de 16 km. En conséquence, les 9/10 de la masse sont situés dans les 16 premiers kilomètres, les 99/100 dans les 32 premiers kilomètres. Pour beaucoup de problèmes, l'atmosphère peut donc être traitée comme une couche de 20 à 30 km d'épaisseur. Certaines études, toutefois, ne pourront négliger l'existence de gaz raréfiés à des distances plus grandes. C'est le cas de la rentrée des satellites dans l'atmosphère où la présence du milieu gazeux se manifeste vers 130 km d'altitude. C'est aussi le cas de la propagation de certaines ondes radioélectriques qui utilisent les propriétés électriques des couches supérieures à 100 km. C'est encore dans ces régions que se manifestent les aurores boréales. Et



La masse d'air B se trouve à l'altitude 5 500 m. Bien que sa température soit de — 33°, c'est une masse « chaude » par rapport à la masse C qui se trouve au sol, à 0°. Ramenée au sol, comprimée et échauffée, B devient identique à A. Les températures potentielles de D et C sont aussi identiques et égales à 0°.

pourtant, à ces altitudes, l'atmosphère présente une densité extrêmement faible, comparable aux densités résiduelles des machines à vide les plus perfectionnées utilisées dans les laboratoires.

Où le chaud et le froid prennent des sens inhabituels

La température de l'air intéresse très directement l'usager de la Météorologie, mais, pour d'autres raisons, elle est une propriété essentielle de l'atmosphère puisqu'elle en conditionne l'existence même.

Les variations de la température de l'air sont expliquées par les lois de la thermodynamique. Pour une masse d'air donnée, deux causes conditionnent ces variations.

La première est presque évidente : il s'agit des apports ou des pertes de chaleur, l'apport de chaleur ayant tendance à élever la température et la perte à l'abaisser.

La seconde est plus subtile. Lorsque la masse atmosphérique se détend, ce qui arrive en général dans un mouvement ascendant, son volume augmente. Elle fournit alors un travail d'expansion contre son environnement. Ce travail n'est pas gratuit, il doit être effectué à partir de réserves énergétiques. Une masse d'air en expansion verra donc sa température diminuer, tout au moins si on ne lui fournit pas de chaleur pendant le même temps. Dans notre atmosphère, pour une élévation de 100 m, l'abaissement de température est ainsi de 1°. Ce mode de variation de la température de l'air est le plus fréquent. La température ne peut donc représenter « la réserve thermique » d'une masse d'air, puisque, indépendamment des apports ou pertes de chaleur, elle prendra des valeurs différentes selon que l'air considéré sera au voisinage du sol ou en altitude. Pour caractériser la réserve thermique en question, les météorologistes ont inventé une notion nouvelle : la température potentielle. C'est la température que prendrait l'air considéré si on le ramenait au niveau du sol (plus exactement, à la pression de 1 000 millibars).

Les météorologistes parlent souvent de masses d'air chaud surmontant dans l'atmosphère des masses d'air froid. Il ne faut pas se méprendre ; l'air « chaud » dont il s'agit possède en général des températures plus faibles que celles de l'air « froid » ; c'est au sens de la température potentielle que le chaud et le froid doivent être compris.

Une minorité agissante

Les variations de température qui se produisent lors des changements d'altitude ont des conséquences importantes sur le comporte-

Photo Rapho

Comme les étoiles filantes, les aurores boréales se manifestent dans les régions de l'atmosphère où l'air n'existe qu'à l'état de traces. Ce phénomène est une luminescence des molécules, ionisées par l'impact des corpuscules d'origine solaire.

Photo Rapho

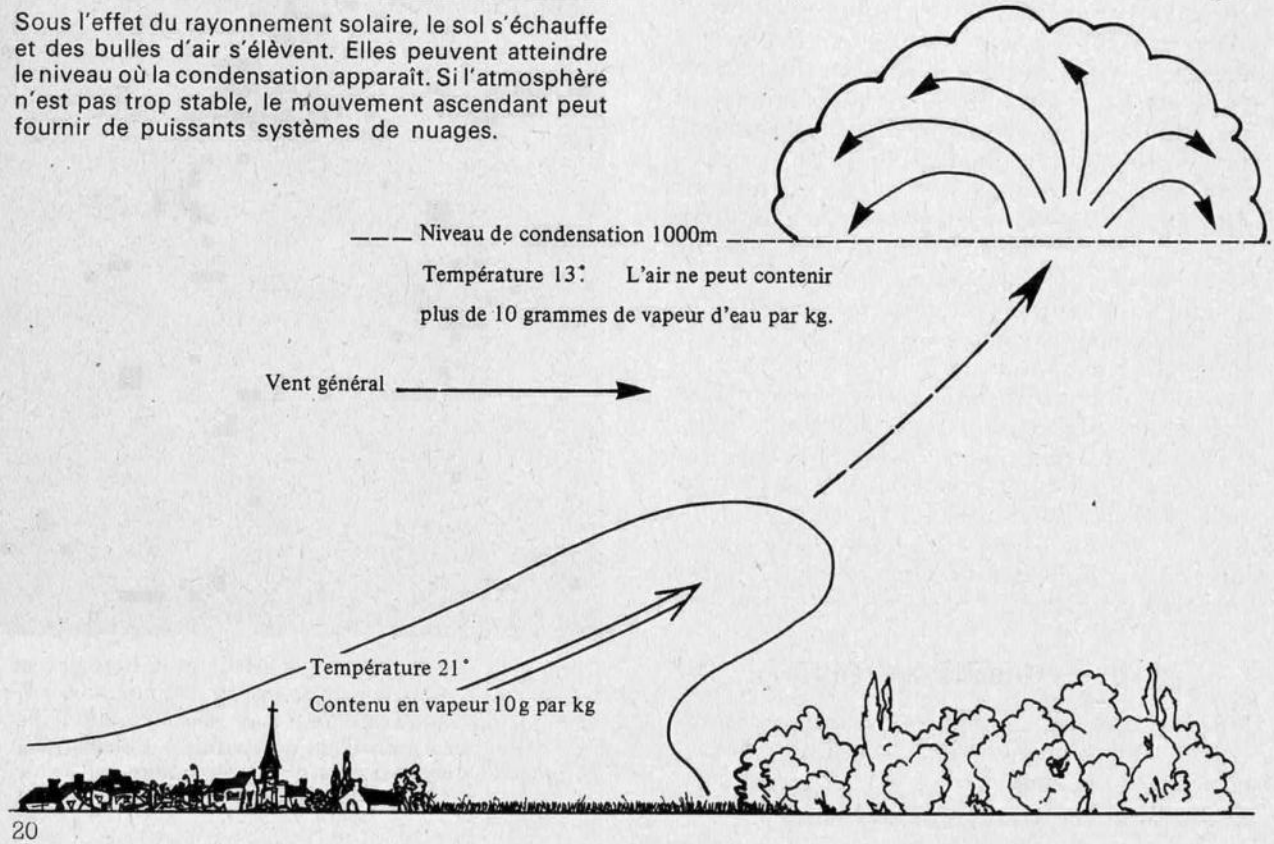
Sous l'effet du rayonnement solaire, le sol s'échauffe et des bulles d'air s'élèvent. Elles peuvent atteindre le niveau où la condensation apparaît. Si l'atmosphère n'est pas trop stable, le mouvement ascendant peut fournir de puissants systèmes de nuages.

ment d'un des composants de l'atmosphère. Sa quantité, de l'ordre de quelques millièmes au plus, peut paraître négligeable mais son influence est essentielle sur le temps. Il s'agit de la vapeur d'eau.

La vapeur d'eau, normalement invisible sous forme de gaz, supporte mal les abaissements de température importants, en particulier ceux dus aux détentes lors de l'ascension des masses d'air. Elle tend alors à se condenser en eau liquide, sous forme de gouttelettes très fines, de l'ordre de 10 microns de rayon, dont l'ensemble forme les nuages. Cette condensation se produit sous forme de liquide (et non de glace) même lorsque la température est négative. C'est seulement pour des températures très négatives, au-dessous de — 15°, que le gaz donne directement de très fines aiguilles de glace.

Dès leur formation, gouttes et cristaux prennent un mouvement descendant, mais avec des vitesses extrêmement faibles, de sorte que les nuages paraissent suspendus dans l'air. L'existence d'un nuage rend visible une zone de l'atmosphère où des courants ascendants se sont produits, et très fréquemment se produisent encore. Les régions où l'air est animé d'un mouvement descendant sont au contraire des régions claires.

Il est relativement facile de déterminer si un nuage est formé de cristaux de glace ou de gouttelettes. Le *cirrostratus* est le nuage de glace typique ; c'est un nuage élevé assez mince qui estompe seulement le bleu du ciel et pro-



duit un halo autour du Soleil ou de la Lune. Ce halo, cercle de 22° ou 46° de diamètre angulaire, dont les dimensions sont déterminées par les constantes cristallographiques de la glace, est irisé, et le rouge se présente à l'intérieur du cercle. Au contraire, le nuage d'eau produit, s'il est mince, une couronne autour du Soleil ou de la Lune. Les dimensions angulaires en sont variables et fonction du rayon des gouttelettes : plus les gouttelettes sont grosses, plus le diamètre angulaire est réduit. En outre, la couronne est irisée de rouge à l'extérieur.

Le nuage de glace peut coexister avec le nuage d'eau, en coiffant sa partie supérieure. On le reconnaît facilement dans le nuage d'averse ou d'orage observé à distance. La partie glacée est fibreuse et soyeuse, tandis que la partie liquide est tourmentée et globuleuse.

Qu'il soit de glace ou de liquide, le nuage ne contient que très peu d'eau, quelques grammes au mètre cube. Si la détente continue à alimenter le nuage par condensation, celui-ci précipite sous forme de pluie ou de neige. Il est en effet assez impropre de dire qu'un nuage «crève ». Le nuage est seulement l'épiphénomène d'un processus fondamental alimentant la condensation, puis la précipitation.

Il est cependant intéressant de dire quelques mots sur le déclenchement des précipitations. Deux mécanismes semblent jouer un rôle. Le premier, souvent considéré comme le seul, est sans doute le plus important dans nos régions. Nous avons vu que la condensation se produisait sous forme liquide jusqu'à des températures franchement négatives. Lorsque les courants ascendants persistent, la condensation se développe vers le haut, vers des régions plus froides, de telle sorte que quelques cristaux de glace peuvent se former. Or, pour une même température, un cristal de glace et une gouttelette d'eau ne peuvent rester en équilibre thermodynamique. La gouttelette s'évapore au profit du cristal de glace. Ainsi, les cristaux de glace, formés d'abord en petit nombre, vont épuiser les gouttelettes plus nombreuses ; ces cristaux vont grossir considérablement et devenir des flocons de neige. Au contact des couches plus basses et plus chaudes de l'atmosphère, la fusion de ces flocons de neige fournira les gouttes de pluie.

Le second mécanisme résulte de l'hétérogénéité de dimension des éléments condensés. Estimée à dix microns en moyenne, cette dimension s'étale sur une plage assez large. Plus l'élément condensé est gros, plus sa vitesse de chute est importante. Les plus gros éléments captent dans leur chute les plus petits qu'ils rencontrent, d'où une chute plus rapide et un processus de captation plus intense. Si le nuage possède une extension verticale suffisante, les gouttelettes atteignent la grosseur des gouttes de pluie.

Beaucoup de bruit pour rien

Lorsque les formations nuageuses sont très importantes, il est fatal que des phénomènes électriques se produisent ; le phénomène électrique est en effet un sous-produit de toute transformation physique. Les mécanismes de ces phénomènes électriques sont assez complexes et encore mal élucidés.

Signalons seulement que l'explication élémentaire consistant à imaginer les nuages comme des conducteurs chargés entre lesquels l'étincelle électrique se produit n'a aucune valeur. Il est en effet bien établi que les nuages ont des conductibilités électriques beaucoup plus faibles que l'air clair environnant.

Le phénomène électrique est évidemment très spectaculaire, mais, d'un point de vue énergétique, il est négligeable, sauf bien entendu pour la personne qui peut en être la victime

Bien que les marges d'incertitude soient très grandes, on peut caractériser les décharges atmosphériques par les ordres de grandeur suivants : 200 000 V, 10 000 A, 100 µs. Ceci correspond à une énergie de 100 000 joules. Imaginons sur une zone de 1 kilomètre carré une décharge toutes les secondes — il s'agit alors d'un orage très spectaculaire — la puissance électrique moyenne produite est de 1 kW par kilomètre carré.

Nous pouvons comparer cette puissance à la puissance mécanique résultant de la simple chute de la pluie d'une altitude de 1 km. Supposons une pluie de 0,6 mm par minute, ce qui fournit 10 tonnes d'eau par seconde et par kilomètre carré. La chute de cette masse correspond à une puissance mécanique de quelque 100 000 kW, soit 10 000 fois plus que n'en produit le phénomène électrique. L'énergie mise en œuvre par une simple chute de la pluie n'est pourtant qu'une fraction de l'énergie du nuage. La chaleur de condensation dégagée par la simple transformation de la vapeur d'eau en eau est bien plus importante. La condensation d'une masse d'eau de 10 tonnes en 1 seconde, nécessaire pour alimenter la pluie sur notre kilomètre carré de surface terrestre, fournit une puissance thermique équivalente à 25 millions de kilowatts.

L'instruction du dossier

Nous avons trouvé le grand responsable du mauvais temps : c'est la vitesse verticale ascendante de l'air. En fournissant cette explication, nous n'avons fait que reporter le problème un peu plus loin. Pourquoi la vitesse verticale existe-t-elle ?

Nous avons tout de même avancé, puisque des phénomènes de nature complexe comme les nuages et la pluie vont s'interpréter maintenant à l'aide d'un concept relativement simple, la *vitesse*. Notre problème météorologique se trouve ainsi ramené dans un cadre plus général, celui de la mécanique des fluides.

La vitesse verticale de l'air peut se présenter de deux façons différentes. Ou bien elle se manifeste avec de fortes valeurs, de l'ordre de 10 m/s ou plus, sur des plages limitées (kilomètre carré ou dizaine de kilomètres carrés), tantôt dirigée vers le haut, tantôt dirigée vers le bas ; ou bien elle affecte avec une valeur de l'ordre du centimètre par seconde, et toujours dans le même sens, des surfaces de plusieurs millions de kilomètres carrés.

Dans le premier cas, les régions ascendantes donneront lieu à des nuages de grand développement vertical mais localisés dans l'espace : il fera un temps d'averses et d'éclaircies. Dans le second cas, nous aurons de grands voiles nuageux très étendus avec pluies continues. Les vitesses ascendantes en plages limitées se présentent souvent sous la forme d'énormes bulles d'air relativement chaud qui se détachent du sol. Le principe moteur est l'échauffement du sol. Il s'agit d'un phénomène analogue à celui constaté dans un récipient chauffé par la base. Toutefois, une caractéristique importante de l'atmosphère va intervenir et rendre efficace ou non le moteur thermique. Il s'agit de la stabilité de la stratification atmosphérique. C'est une notion assez complexe à définir, mais, en simplifiant beaucoup, nous dirons que la stratification atmosphérique sera d'autant plus stable que la diminution de la densité avec l'altitude sera plus grande. On conçoit qu'une grande stabilité s'oppose à des bouleversements verticaux, tandis qu'une faible stabilité les laisse se développer.

Nous savons que la densité d'un gaz est étroitement liée à sa température. L'air chaud étant plus léger que l'air froid à la même pression, la stabilité sera donc associée à la répartition verticale des températures. Comme nous sommes dans un gaz stratifié où la pression varie avec l'altitude, nous verrons la température potentielle remplacer la température usuelle. C'est pourquoi l'atmosphère est stable si la température potentielle augmente avec l'altitude. Elle est d'autant plus stable que cette augmentation est rapide.

La possibilité de condensation vient compliquer le problème. Les critères de stabilité d'une atmosphère nuageuse étant différents de ceux d'une atmosphère claire, nous nous trouvons souvent devant le cas où l'atmosphère est stable dans la mesure où elle reste claire, mais instable lorsqu'elle devient nuageuse. Si un nuage apparaît localement, l'instabilité se manifeste en même temps et le bouleversement vertical est amplifié.

Les mouvements verticaux d'ensemble sont dus à des causes différentes. Il s'agit alors d'un effet d'adaptation de l'atmosphère aux contraintes présentées par les mouvements horizontaux de ses divers niveaux. Il est temps de parler de ces mouvements horizontaux, qui sont, en fait, les mouvements les plus importants de l'atmosphère.

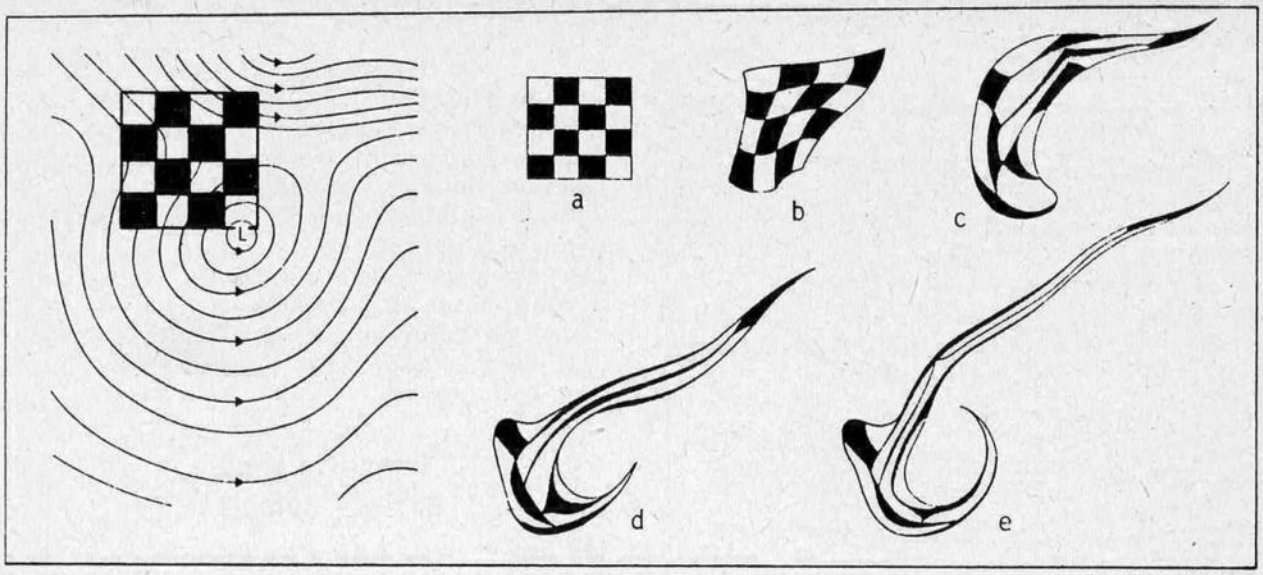
Des phénomènes migrateurs

On s'est aperçu, il y a un siècle environ, que les phénomènes violents ou importants se produisant dans l'atmosphère étaient souvent des phénomènes migrateurs. En conséquence, l'idée primitive de la prévision consiste — et cette idée subsiste en grande partie — à détecter les phénomènes migrateurs et à en déterminer le déplacement, déplacement en étroite relation avec le mouvement horizontal de l'air.

Nous pouvons étudier ce mouvement horizontal en prenant le modèle d'atmosphère le plus simple, celui où les colonnes atmosphériques se déplacent en bloc. Nous ignorons ainsi les variations de la vitesse horizontale avec l'altitude. C'est le modèle de la pellicule atmosphérique à deux dimensions seulement. Cette schématisation grossière permet cependant d'interpréter un certain nombre de phénomènes.

Il existe deux façons d'étudier le mouvement d'un fluide. La première paraît la plus naturelle : c'est la façon « lagrangienne ». On isole par la pensée certains éléments du fluide atmosphérique, des particules dont on suit le déplacement au cours du temps. On étudie la trajectoire d'une particule, et la détermination de cette trajectoire sera un élément important de la prévision.

Cette conception séduisante soulève cependant des difficultés fondamentales. Ces difficultés existent d'ailleurs d'une façon larvée dans toutes les branches de la mécanique des fluides, mais elles deviennent manifestes dans la mécanique de l'atmosphère. Quelles dimensions doit-on donner à la particule ? Du point de vue de la théorie mécanique, ce sera un point matériel ; du point de vue concret, la particule doit rendre compte des propriétés d'ensemble de l'air et non de fluctuations très locales. On est alors amené à lui donner des dimensions horizontales respectables, 10, 20, peut-être 100 kilomètres de rayon. Traiter des éléments concrets correspondant à ce deuxième point de vue en appliquant des conceptions relatives au premier conduit à des paradoxes. Un point est toujours bien défini, sa localisation ne pose pas de problèmes. La



D'après P. WELLANDER

Les particules atmosphériques perdent leur individualité au cours de leurs déplacements. C'est ce que montre cette série de dessins où, au départ, 16 particules fictives forment damier. Entraînée par les lignes de courant, le damier devient peu à peu méconnaissable. L'évolution s'effectue dans un intervalle de 24 heures.

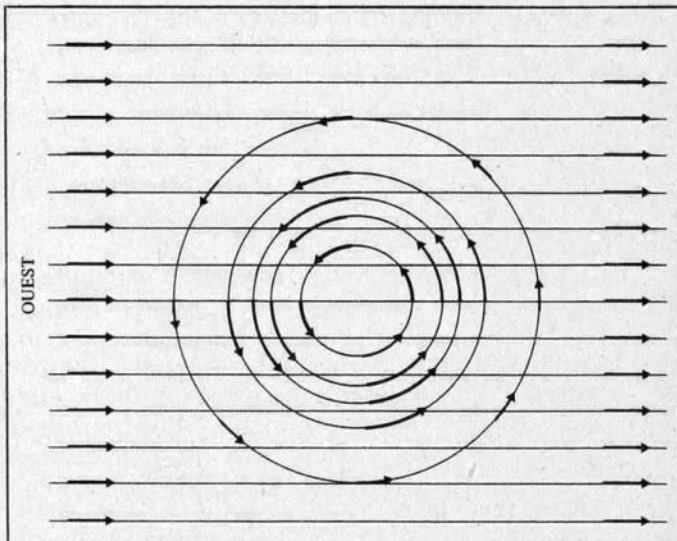
particule atmosphérique, au contraire, se détériore au cours du temps, sa localisation devient imprécise et son individualité se perd. Définie initialement comme un ensemble de molécules bien compact, elle va prendre au cours du temps des formes filamenteuses augmentant sa surface de contact avec l'extérieur et favorisant le mélange.

A cette idée de particule est liée l'idée de transfert. La particule transporte ses propriétés. Si quelques propriétés sont effectivement approximativement transportées sans modifications (c'est le cas, avec certaines réserves, de la teneur en vapeur d'eau, de la température potentielle), la notion de transport s'adapte moins bien lorsqu'il s'agit de certaines grandeurs essentielles en mécanique des fluides, par exemple la pression ou le vecteur vitesse. Si une particule est animée d'un vent Nord-Ouest de 10 m/s, après son transfert pendant un certain temps, elle ne se trouvera pas en général animée du même vent. Il existe en effet des forces, ou plus exactement des composantes horizontales des forces créées par le milieu fluide lui-même, qui fournissent à la particule des accélérations positives ou négatives susceptibles de modifier sa vitesse. Il convient donc de rechercher quels éléments peuvent être transportés sans être altérés. En particulier, si nous voulons prévoir le mouvement futur, notre intérêt se portera spécialement sur des éléments cinématiques. Un tel élément cinématique peut se conserver dans le déplacement, tout au moins approximativement. Il s'agit du tourbillon.

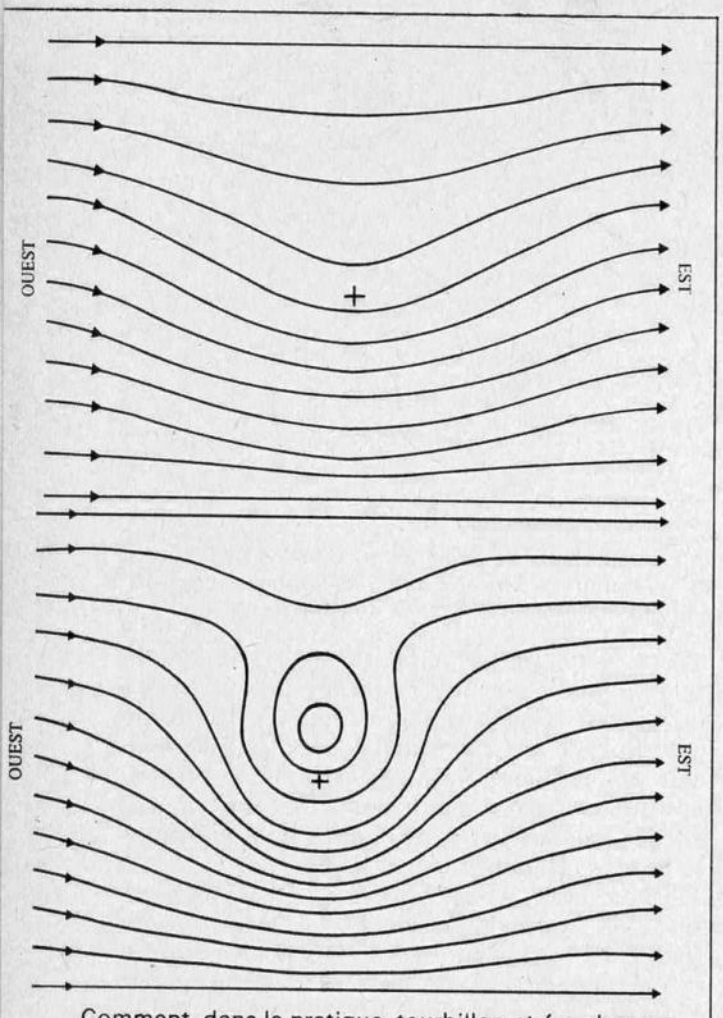
Le déplacement d'un tourbillon

Le tourbillon est une grandeur caractérisant la répartition de vitesses autour d'un point ; il représente physiquement le mouvement de rotation de la particule autour de son centre de gravité. C'est une propriété continue de l'atmosphère au même titre que la pression, mais des régions relativement limitées présentent un caractère tourbillonnaire plus accentué que mettent en évidence les photographies de nuages effectuées par satellites.

Contrairement à la vitesse, le tourbillon se conserve approximativement, car les forces auxquelles sont soumises les particules (forces de pression de la part du milieu environnant, et forces d'inertie dues à la rotation de la Terre) ne présentent que peu d'effet rotatoire ; on dit qu'elles dépendent d'un potentiel. Un



Un tourbillon emporté par un courant régulier Ouest-Est. La longueur des flèches représente la vitesse du vent. Dans certaines régions, la vitesse du tourbillon est supérieure à celle du courant et dirigée en sens inverse, d'où un vent résultant d'Est.



Comment, dans la pratique, tourbillon et écoulement s'additionnent géométriquement. En 1, le tourbillon possède une faible intensité et les lignes de courant sont seulement incurvées. En 2, le tourbillon est plus intense mais son dessin très dissymétrique. Le centre apparent du tourbillon ne coïncide d'ailleurs pas avec le centre réel (indiqué par une croix).

effet rotatoire se manifestera seulement si des hétérogénéités de température se présentent indépendamment des hétérogénéités de pression.

Dans l'atmosphère, les régions tourbillonnaires peuvent s'étendre sur plusieurs milliers de kilomètres. Les vitesses angulaires de rotation sont très faibles et deviennent comparables à la vitesse angulaire de la Terre elle-même. Dans la détermination du tourbillon qui doit se conserver au cours du déplacement il y a donc lieu de tenir compte de l'effet tourbillonnaire de la Terre (tourbillon d'entraînement) (1). Celui-ci ne se manifeste d'ailleurs, lorsque l'on considère les mouvements horizontaux de la particule atmosphérique, que par sa composante verticale, maximale aux pôles et nulle à l'équateur. La variation de latitude modifiera donc le tourbillon apparent dans son transport.

Les éléments fondamentaux de la prévision à court terme (2 jours) du mouvement horizontal de l'atmosphère sont fondés sur cette idée de la conservation du tourbillon absolu dans le transport.

(1) Les lois de la mécanique ne sont simples que si le repère dans lequel on étudie les phénomènes est fixe ou animé d'un mouvement uniforme par rapport aux étoiles. Au voisinage de la terre, nous devons considérer la somme du mouvement observé, mouvement relatif, et du mouvement de rotation du globe, mouvement d'entraînement, pour traiter le mouvement absolu.

Quand le simple devient complexe

Cet aspect « lagrangien » de l'étude de la mécanique atmosphérique est mal adapté à l'expérimentation quotidienne. Les particules sont difficiles à suivre au cours du temps et ce n'est jamais au sein de la même particule que les mesures sont effectuées. C'est au contraire en des points fixes, et quelquefois d'une façon continue dans le temps, que les appareils de mesure travaillent. Ils enregistrent alors les propriétés de diverses particules ayant défilé sur une station. Il s'agit de l'aspect « eulérien » de la description du fluide. Le mouvement ne sera plus décrit par des trajectoires matérialisant des vitesses à des moments successifs, mais par la cristallisation à un instant donné de l'état des vitesses. On pourra alors tracer des lignes tangentes en chacun de leurs points aux vitesses constatées. Ce sont les lignes de courant. C'est en fait par le dessin de ces lignes, ou, comme nous le verrons, le dessin des lignes qui ont une forme voisine que le météorologiste connaît les mouvements atmosphériques.

A certains égards, cette représentation est moins directe et moins physique que celle des trajectoires de particules.

Des phénomènes simples peuvent ainsi être masqués. Imaginons un tourbillon très régulier, immergé dans un courant fluide, lui-même régulier et parallèle. Les vitesses s'additionneront géométriquement dans la région du tourbillon et le schéma des lignes de courant pourra prendre diverses formes. Si la vitesse tourbillonnaire excède en certains points la vitesse d'entraînement, il y aura renversement de la vitesse du courant porteur et formation d'une ligne de courant fermée dont le centre ne sera d'ailleurs pas le centre du tourbillon. Si la vitesse tourbillonnaire n'est en aucun point supérieure à la vitesse du courant porteur, nous aurons une simple déformation des lignes de courant dans la région du tourbillon.

Voyons maintenant comment le même phénomène physique simple, un tourbillon entraîné par un courant porteur Ouest-Est, appa-

raîtra à un observateur situé en un point fixe. Prenons le cas du tourbillon faible, le centre du tourbillon passant au Nord de l'observateur. Celui-ci observe tout d'abord un vent d'Ouest, qui tournera au Sud-Ouest en augmentant, reviendra à l'Ouest, toujours en augmentant, passera au Nord-Ouest en diminuant et reviendra à l'Ouest avec sa valeur primitive. L'observation sera sensiblement la même dans le cas d'un tourbillon fort. Dans le cas où le centre du tourbillon passe au Sud, la même oscillation de direction du vent est observée, mais la vitesse est réduite au moment du passage du tourbillon. Dans le cas du tourbillon fort, passant suffisamment au Sud de la station, le vent d'Ouest faiblira en s'orientant au Sud-Ouest, puis au Sud, Sud-Est, Est, Nord-Est, Nord, Nord-Ouest, pour retrouver sa vitesse initiale en repassant à l'Ouest.

Nous voyons ainsi un phénomène physiquement très simple et dont la prévision d'évolution est élémentaire, apparaître obscur à l'observateur local et même au météorologiste faisant la synthèse des observations locales pour construire sa carte d'écoulement.

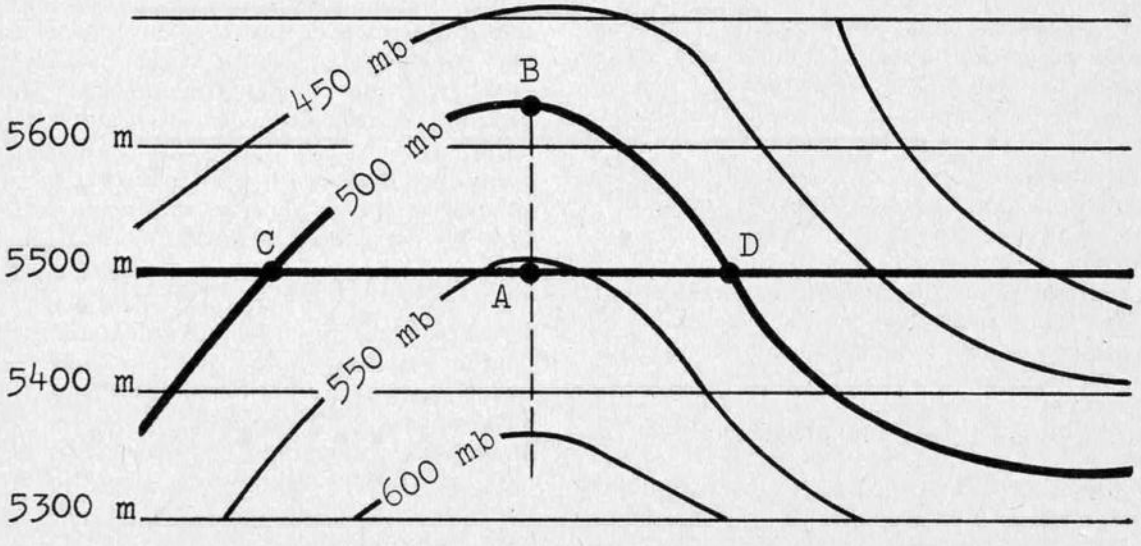
Isobares et anticyclones

En décrivant les mouvements horizontaux, nous avons été amenés à introduire les contraintes créées par le milieu fluide lui-même sur chacune de ses particules en mouvement. Ces contraintes sont apparues par l'intermédiaire de variations de pression sur des plans horizontaux. Il est nécessaire d'étudier plus en détail cette répartition de la pression.

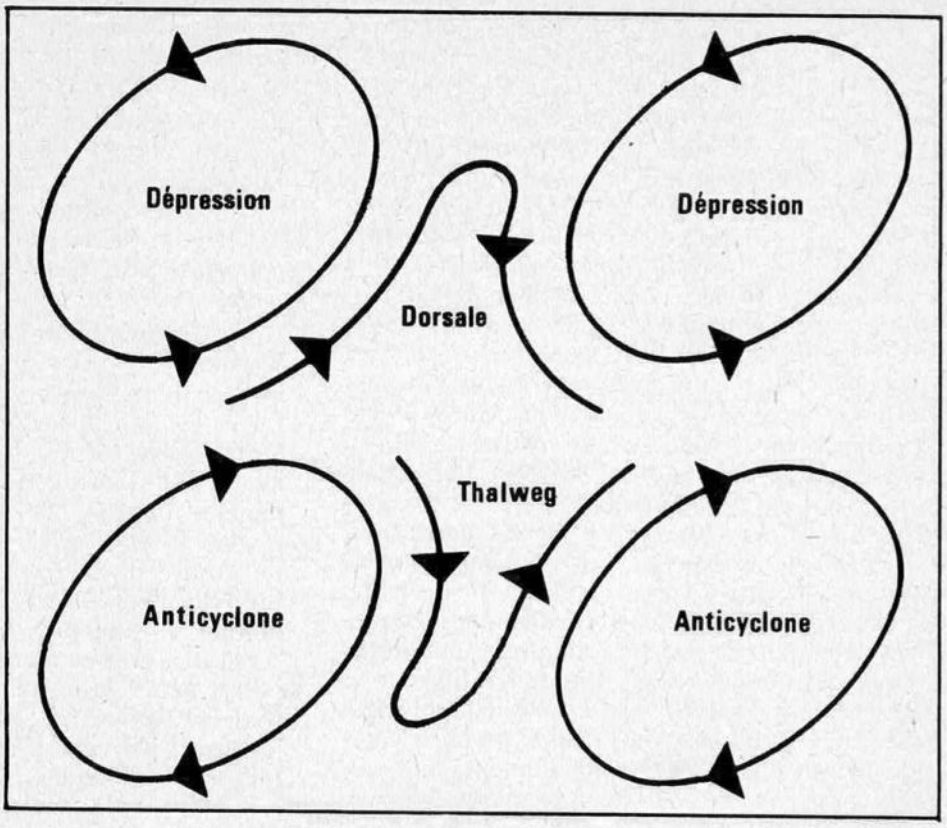
En tous points de la surface terrestre, les surfaces de niveau sont perpendiculaires au vecteur pesanteur. Localement, elles peuvent être considérées comme des plans horizontaux et, à l'échelle de la planète, comme des sphères concentriques. Chaque surface de niveau est caractérisée par son altitude.

Les surfaces isobares sont des surfaces où tous les points présentent la même pression. Si l'atmosphère était en parfait équilibre, les surfaces de niveau coïncideraient partout avec les isobares. Certes, tous les points où la pression est de l'ordre de 1 000 mb se situent en général un peu au-dessus de la surface de niveau 0, et tous les points où la pression est de l'ordre de 500 mb au voisinage de la surface de niveau 5 500 m. Mais si nous voulons étudier un peu plus finement cette répartition de la pression, nous nous apercevons que deux points situés à la même altitude, mais distants horizontalement de plusieurs centaines de kilomètres, peuvent présenter des pressions différant de quelques millibars. Ceci permet de localiser sur des surfaces de niveau des régions de basses pressions ou des régions de pressions plus élevées. Les lignes qui correspondent sur une surface de niveau à des points où la pression est la même sont des *lignes isobares.*

On utilise en fait, assez souvent, une autre représentation qui apporte une information analogue. Plutôt que d'envisager la répartition



Sur cette section verticale de l'atmosphère sont représentées les surfaces d'altitude 5 300 à 5 600 m et les surfaces isobares de 450 à 600 millibars. Le point B, d'altitude plus élevée que C et D, est situé au maximum d'altitude de la surface 500 millibars. Le point A est au maximum de pression de la surface 5 500 m.



Ce schéma est relatif à l'hémisphère Nord. Le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones, en sens inverse autour des dépressions. On appelle thalweg un dessin d'isobare en V, avec basses pressions à l'intérieur du V. La dorsale est la figure avec hautes pressions à l'intérieur du V.

des pressions sur une même surface de niveau, on étudie la répartition des niveaux d'une même surface isobare. Celle-ci présente des bosses et des creux et peut être représentée, à la façon d'une surface topographique des géographes, par des lignes de niveau : ce sont les lignes de la surface isobare donnée dont tous les points sont à même altitude. On conçoit facilement que l'analogie entre les deux représentations est grande puisque chaque ligne de niveau est aussi une ligne isobare ; la seule différence provient de ce que les régions atmosphériques explorées ne sont pas exactement les mêmes. Ainsi une région de haute pression ou anticyclone se caractérisera par des cotes élevées de la surface isobare ou par des pressions élevées de la surface de niveau, tandis qu'une région de basse pression ou dépression se caractérisera par des cotes basses de la surface isobare et des pressions basses de la surface de niveau.

Les vents et les pressions

Une idée couramment admise, et souvent enseignée dans les cours de géographie introduisant à la météorologie, présente l'origine du vent horizontal dans le déséquilibre de la répartition horizontale des pressions. Ce point est relativement correct bien que la proposition inverse : l'origine du déséquilibre de la répartition horizontale des pressions est due au vent horizontal, paraisse plus vraisemblable. Elle n'est toutefois pas tout à fait exacte.

Assez généralement, l'explication classique se poursuit en indiquant que le vent se dirige des hautes vers les basses pressions. La simplicité de cette idée est séduisante, mais elle ne correspond en rien à la réalité atmosphérique. Il existe certes une composante horizontale de la force de pression dirigée des hautes vers les basses pressions. Mais une force n'est pas liée à une vitesse. Tout au plus peut-elle produire des accélérations, c'est-à-dire des variations de vitesse, dans des situations où l'équilibre ne serait pas réalisé. Or l'atmosphère est un *système au voisinage de l'équilibre*. Il est nécesaire de se pénétrer de cette idée si l'on veut comprendre son comportement.

Il est certain que le météorologiste ayant la charge quotidienne de prévoir le temps, et qui s'intéresse essentiellement aux écarts de l'atmosphère par rapport à son régime d'équilibre, est conduit à sous-estimer cette caractéristique. Il n'en est plus de même lorsque le souci de compréhension prend le pas sur celui de la prévision.

Nous avons déjà vu que les conditions d'un équilibre selon la verticale étaient presque réalisées. En examinant plus finement les répartitions horizontales de pression, nous avons du faire quelques réserves.

En passant d'une conception d'équilibre statique à une notion d'équilibre dynamique, nous allons améliorer l'interprétation.

Dans un système au voisinage de l'équilibre dynamique, les vitesses sont grandes devant les accélérations. Cette comparaison des vitesses et des accélérations demande toutefois de préciser une échelle de temps, caractérisée par la durée pendant laquelle les faibles accélérations devraient continuellement agir pour modifier considérablement les vitesses. Dans les problèmes étudiés, cette durée est de l'ordre du jour.

L'accélération du mouvement est conditionnée par les forces agissant sur les particules d'air. Parmi celles-ci figure la force de pression, mais aussi les forces d'inertie dues au mouvement lui-même.

Dans un système en équilibre dynamique, le mouvement s'adapte pour créer les forces d'inertie nécessaires à l'équilibrage, au moins approximatif, des autres forces qui sollicitent le système.

Nous avons une situation analogue dans les mouvements cosmiques, en particulier avec le mouvement d'un satellite après sa mise en orbite, ou le mouvement d'une planète depuis l'explosion hypothétique qui a pu la mettre, elle aussi, en orbite. Nous savons, par exemple, que la Lune est attirée par la Terre, c'est-à-dire qu'elle subit une force attractive dirigée vers la Terre. Toutefois le mouvement même de la Lune engendre une force centrifuge opposée à l'attraction, et la Lune se déplace perpendiculairement à cette force. Les conditions d'équilibre sont ainsi réalisées, sans quoi la Lune serait déjà, soit tombée sur la Terre, soit disparue de son domaine d'attraction.

L'atmosphère, qui existe sans doute depuis fort longtemps, a réalisé elle aussi un régime d'équilibre, moins net peut-être que celui du mouvement de la Lune, puisque des perturbations temporaires l'en écartent continuellement.

L'équilibre entre le mouvement et la pression [1] est assez délicat à analyser. Il est exprimé par une équation aux dérivées partielles dont le domaine d'application s'étend à toute la planète. Nous pouvons toutefois en donner une approximation simple, valable en dehors des régions équatoriales.

Le vent horizontal correspondant au régime d'équilibre (ou vent géostrophique) est caractérisé par son *parallélisme aux lignes isobares*. Il est d'autant plus fort que la variation horizontale de pression est grande. Il laisse les hautes pressions à la droite du mouvement dans l'hémisphère Nord, tandis que la situation inverse se produit dans l'hémisphère Sud.

(1) On appelle cet équilibre l'équilibre géostrophique et le vent théorique résultant de cet équilibre s'appelle vent géostrophique. Le vent réel est voisin de ce vent théorique.

A la poursuite de l'équilibre

Il arrive fréquemment que, sur une surface de niveau, les lignes isobares se présentent sous forme de courbes fermées entourant une dépression ou un anticyclone. Dans le premier cas, le vent géostrophique dirigé parallèlement aux isobares tourne autour du centre de basses pressions dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère Sud. Ce sens est appelé *sens cyclonique*, parce qu'il correspondrait au sens de rotation de la Terre si l'on déplaçait dans leur hémisphère les dépressions pour les centrer sur les pôles respectifs. Dans le deuxième cas, nous avons inversion du sens, qui est alors appelé *sens anticyclonique*. La région entourée par un écoulement anticyclonique s'appelle effectivement un anticyclone.

Nous pouvons traduire ces résultats pour des représentations sur des surfaces isobares (lignes isobares sont remplacées par lignes de niveau et hautes pressions par cotes élevées).

C'est parce que le vent réel est voisin du vent correspondant au régime d'équilibre qu'en dehors des régions équatoriales, l'écoulement de l'atmosphère et ses lignes de courant sont interprétés par le dessin des lignes isobares ou celui des lignes de niveau, la vitesse du vent étant d'autant plus forte que les lignes sont plus serrées.

Dans les régions tempérées des deux hémisphères, le vent vient en général de l'Ouest, tandis qu'entre les Tropiques, il vient de l'Est. A ce régime est lié le profil de pression : basses pressions dans les régions polaires, pression relativement basse à l'équateur, et ceinture de hautes pressions dans les régions tropicales. L'adaptation exacte entre la répartition des pressions et la répartition des vitesses résultant des règles du géostrophisme n'est jamais réalisée exactement dans l'atmosphère. Comme un pendule, le déséquilibre entre la répartition des pressions et celle des vents horizontaux oscille. Cependant, dans l'atmosphère, les conditions de l'équilibre (ce qui dans l'image du pendule correspond à la verticale) sont continuellement modifiées par le transport même des particules. Toutes les propriétés des particules atmosphériques, y compris vent et pression, ont une tendance naturelle à être transportées dans le simple déplacement des particules. Comme ces transports ne sont pas homogènes, la répartition des vitesses horizontales et la répartition ho-

rizontale des pressions, à supposer qu'elles fussent initialement accordées, se déséquilibreront. Ainsi l'atmosphère court continuellement après un équilibre exact qu'elle n'atteint jamais. En reprenant l'image du pendule, tout se passe comme si le point de suspension du fil était constamment déplacé.

Au cours de ces adaptations géostrophiques, nous voyons apparaître un élément nouveau et important du mouvement horizontal : la divergence ou la convergence horizontale.

Imaginons toujours que nous travaillons sur des colonnes atmosphériques qui se déplacent en bloc. Si, au cours du déplacement, la colonne atmosphérique s'écrase en élargissant sa section horizontale, il y a naissance de vent vertical d'ensemble vers le bas et divergence horizontale. Si au contraire la colonne se rétrécit en s'allongeant, il s'agit de vent vertical dirigé vers le haut et de convergence horizontale.

La vitesse verticale d'ensemble

Nous avons précédemment indiqué un moyen pour déterminer le mouvement futur de l'air. Les tourbillons sont emportés par des mouvements porteurs qui, eux-mêmes, ne représentent que les éléments d'un tourbillon d'une plus grande échelle, tel que le courant moyen Ouest-Est ceinturant la Terre dans les régions tempérées. Ce point de vue est seulement approché : nous avons déjà indiqué qu'un changement de latitude modifiait la valeur du tourbillon.

Le tourbillon est aussi modifié par la divergence ou la convergence. S'accélérant si la section diminue, il ralentit si la section augmente. C'est l'application d'un principe de mécanique bien connu, utilisé en particulier par les ballerines pour ralentir ou accélérer leur rotation en étendant (divergence) ou en ramenant les bras (convergence) au voisinage du corps.

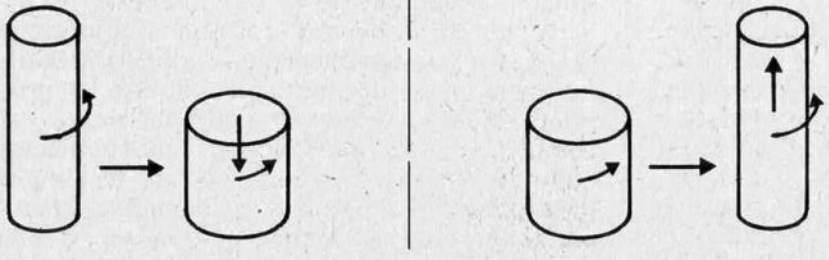
Il existe, en fait, deux façons de prendre le problème de l'évolution atmosphérique. En nous fixant comme thème la construction future de la répartition des vitesses horizontales, nous utilisons la conservation du tourbillon dans les déplacements, conservation amendée par les effets de convergence-divergence. En nous fixant comme thème la répartition des pressions, par exemple en imaginant que, dans les transports, les températures potentielles sont conservées, nous pourrons calculer comment sont modifiées les masses plus ou moins chaudes qui composent la colonne et en déduire le nouveau poids de la colonne atmosphérique déplacée. Ici encore, la divergence-convergence va intervenir : si la colonne s'écrase, une même masse sera répartie sur une section plus grande et la pression résultante sera plus faible.

Nous devons, en fait, utiliser séparément ces deux points de vue, en prenant la divergence ou la convergence comme inconnue. L'obtention d'un résultat d'évolution, où la répartition des pressions est adaptée à chaque niveau à la répartition des mouvements horizontaux, conduit à l'estimation de la divergence-convergence, et par conséquent à la détermination de la vitesse verticale.

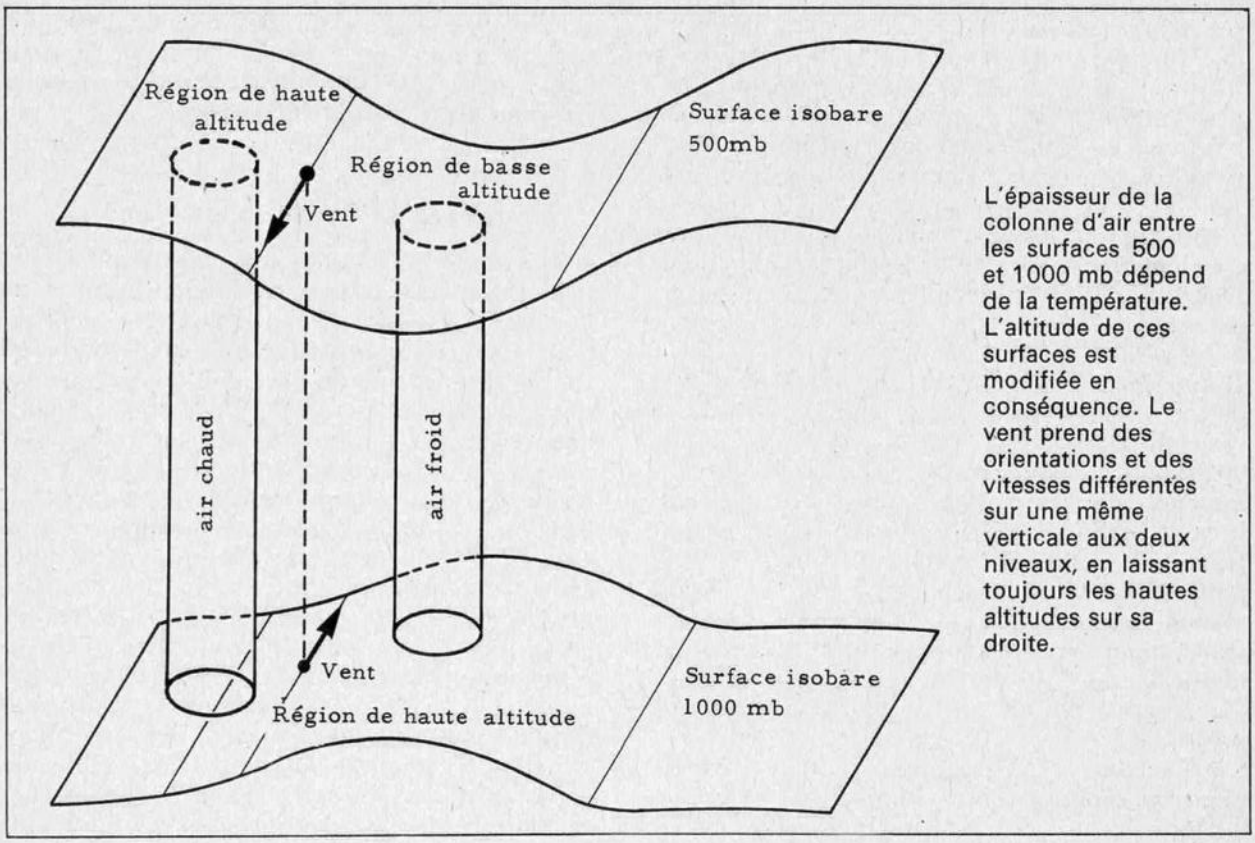
C'est en partant de cette idée que sont construites les méthodes de prévision numérique du mouvement horizontal de l'air et de détermination de la vitesse verticale d'ensemble, si importante par ses conséquences sur le temps.

Nous pouvons retenir quelques applications qualitatives des schémas d'évolution proposés. Les tourbillons cycloniques ont tendance à s'atténuer lorsqu'ils se dirigent vers les pôles. Seule la partie du tourbillon repérée sur la Terre est visible, alors que le tourbillon absolu, somme du tourbillon relatif et du tourbillon de la Terre, doit se conserver. Lors d'un déplacement vers les pôles, l'effet tourbillonnaire de la Terre dans un plan horizontal augmente, et ceci conduit à une diminution du tourbillon relatif.

Si des convergences se manifestent, il y aura accélération du tourbillon cyclonique et création de vitesses verticales ascendantes. Celles-ci engendreront des nuages rendant visible les tourbillons atmosphériques. La forme spiralée des tourbillons nuageux détectés par les satellites indique en général un effet de convergence.



A gauche, la colonne atmosphérique subit dans son déplacement un effet de divergence. Elle s'aplatit et ralentit sa rotation. A droite, elle subit un effet de convergence. Sa rotation s'accélère en spirale ascendante.



L'épaisseur de la colonne d'air entre les surfaces 500 et 1000 mb dépend de la température. L'altitude de ces surfaces est modifiée en conséquence. Le vent prend des orientations et des vitesses différentes sur une même verticale aux deux niveaux, en laissant toujours les hautes altitudes sur sa droite.

Le vent et la température

L'adaptation entre l'écoulement horizontal et la répartition horizontale des pressions se fait à chaque niveau dans l'atmosphère, mais la répartition horizontale des pressions varie avec l'altitude. Pour un même décalage d'altitude, la pression varie moins dans une région chaude de l'atmosphère que dans une région froide. Ainsi la variation verticale des répartitions horizontales de la pression sera fonction de la répartition horizontale de température, et par conséquent la variation verticale du vent sera conditionnée par les répartitions horizontales de température. C'est ce que les météorologistes appellent la règle du « vent thermique ».

Cette relation est peut-être la loi la plus importante de la physique de l'atmosphère. Elle établit en effet la dépendance entre l'aspect thermique et l'aspect cinématique. On conçoit assez facilement, en effet, que les causes premières du mouvement soient des causes thermiques et que l'atmosphère se comporte plus ou moins comme une machine fabricant du mouvement à partir de sources thermiques. La règle du « vent thermique » est assez simple à formuler : la variation du vent avec l'altitude est dirigée parallèlement aux lignes isothermes d'une surface isobare. Pour un courant zonal venant de l'Ouest et augmentant avec l'altitude, ce qui est le cas dans la troposphère pour les régions tempérées, les régions froides sont situées vers les régions polaires. C'est bien ce qui est observé. Par contre, en nous plaçant toujours dans les régions tempérées, le vent d'Ouest diminue avec l'altitude dans la stratosphère ; il y correspond une stratosphère équatoriale plus froide que la stratosphère polaire ; ceci est encore un résultat d'observation.

Air froid contre air chaud

L'appréciation correcte de l'évolution de l'atmosphère par l'application quantitative des lois de la dynamique, couplées aux lois de la thermodynamique dans des modèles physiques où les phénomènes d'apport de chaleur et de dissipation par frottement ne sont d'ailleurs traités que très empiriquement, ne date que d'une décade ou deux. Des prévisions d'évolution étaient cependant faites bien avant. Il est bon d'en examiner les supports, d'autant plus, d'ailleurs, que ces supports reflètent certaines propriétés de l'atmosphère qui ne sont pas prises en compte dans les conceptions mathématiques actuelles.

La loi d'adaptation entre le mouvement et la pression est connue dans ses grandes lignes depuis un siècle. C'est grâce à cette loi que la météorologie a pu dépasser le cadre local. Les météorologistes se sont alors attachés presque uniquement à décrire et à prévoir la

répartition horizontale des pressions. Il y eut des méthodes d'extrapolation des centres de hautes mais surtout de basses pressions fondées initialement sur l'empirisme. Elles retrouvent un sens dans les conceptions relatives au transfert du tourbillon. Mais le travail fondamental devait porter sur l'évolution même des centres déplacés, c'est-à-dire le creusement ou le comblement des dépressions. Dans une conception mécaniste, ceci s'interprète par l'accélération ou le ralentissement du tourbillon cyclonique.

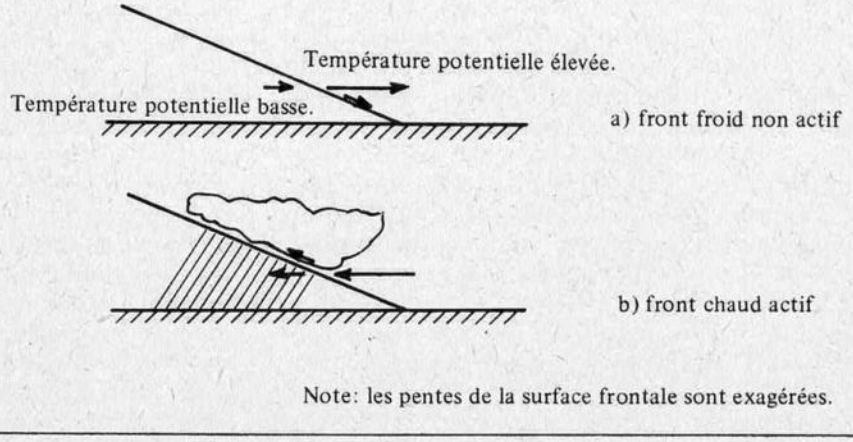
Il apparut très vite qu'un élément fondamental de la variation de pression était le remplacement de masses d'air froid par des masses plus chaudes ou inversement. C'est ce que l'on appelle l'*advection*. Si, à un certain niveau, le vent horizontal souffle à partir d'une région froide, il y aura advection froide ; si c'est à partir d'une région chaude il y aura advection chaude. La répartition des températures et des vents, ou même des pressions à un moment donné, permet de prévoir les advections. Mais comment celles-ci vont elles réagir sur les pressions ?

S'il s'agissait d'un gaz enfermé dans un récipient, la réponse serait simple. Une élévation de température fait monter la pression. Si le récipient est ouvert, tel un manchon cylindrique, ce qui, dans une certaine mesure, peut simuler une colonne atmosphérique, nous aurions une autre réponse : le gaz dont la température est élevée se dilate et s'échappe ; la masse contenue dans le récipient diminue et la pression à la base ou à un niveau quelconque s'affaiblit.

Dans l'atmosphère, les colonnes ne sont pas contenues dans un récipient et il y a remplacement continuel de l'air. La problème ainsi posé n'a reçu une réponse numérique que depuis une dizaine d'années. Cette réponse n'est pas simple et elle met en œuvre l'intégration de l'ensemble des lois de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Toutefois, sans prétendre atteindre d'une façon numérique la grandeur des phénomènes, une approche rationnelle de la variation de pression causée par les phénomènes thermiques fut dégagée par la théorie morphologique des surfaces frontales.

Surfaces frontales et fronts

L'examen des structures thermiques atmosphériques fait apparaître une faible variation de la densité des réserves thermiques des masses d'air (caractérisée par la température potentielle) sur de grandes régions, et par contre des variations brusques dans des régions limitées. Ceci conduit à imaginer que les masses d'air atmosphériques, chaudes ou froides, se forment soit dans les régions équatoriales, soit dans les régions polaires, acquérant ainsi leurs propriétés thermiques (température potentielle) et leur humidité. Conservant leurs propriétés originelles (tout au moins certaines d'entre elles), ces masses d'air se trouvent ensuite amenées au voisinage l'une de l'autre. Elles ne se mélangent alors que difficilement, et leur surface de séparation, appelée *surface frontale*, est susceptible de persister. Pour être en équilibre dynamique, ces surfaces de discontinuité doivent être inclinées par rapport à la verticale, de telle sorte que le profil d'une surface frontale doit toujours se présenter, dans la pellicule atmosphérique, comme un coin aigu, insérant une masse d'air froid sous une masse d'air plus chaud. L'intersection de la surface frontale avec le sol est appelé *front*. Les déplacements par rapport au sol de la surface frontale engendrent des advections chaudes ou froides. Un déplacement engendrant une advection froide au sol fait appeler le front correspondant « front froid » tandis que, dans le cas d'une advection chaude, il s'agit d'un « front chaud ». Si la surface frontale se déplace parallèlement à elle-même, il n'y a pas d'advection, et le front correspondant est appelé « front stationnaire ».



Surface frontale : selon l'orientation du vent, en a, advection froide, en b, advection chaude. En a, le vent horizontal est divergent et un vent descendant se manifeste dans l'air chaud. En b, la convergence horizontale engendre un vent ascendant et des pluies.

Il faut noter qu'à chaque niveau, et en particulier au sol, la surface frontale se situe dans un minimum relatif de pression ; ceci peut se montrer si la surface frontale est au voisinage de son équilibre dynamique.

Les vitesses horizontales dans l'air froid et dans l'air chaud d'origines différentes ne sont pas en général accordées et certains glissements horizontaux entre les deux masses d'air peuvent se produire. Si le désaccord affecte la composante de vitesse perpendiculaire à la surface frontale, une vitesse verticale doit être engendrée pour assurer la continuité du milieu fluide. C'est ainsi qu'au niveau des surfaces frontales, la vitesse verticale d'ensemble prend des valeurs privilégiées, l'air chaud escaladant ou dévalant la pente constituée par la surface frontale. Par suite de la faible inclinaison de ces surfaces, les bandes affectées par la vitesse verticale peuvent présenter des largeurs de plusieurs centaines de kilomètres. Si l'air chaud grimpe la pente, la surface frontale est un lieu de condensations et même de précipitations ; le front correspondant est dit « actif ». Dans le cas contraire, la surface frontale est un lieu de dissolution des nuages.

On a pris l'habitude de s'intéresser uniquement aux fronts actifs, puisque ceux-ci sont plus aisément détectés par leurs manifestations atmosphériques, et le front est devenu rapidement synonyme de région de mauvais temps (associée d'ailleurs à une basse pression relative). C'est ainsi qu'une idée, parfois aberrante, se trouva justifiée : les zones de mauvais temps correspondent aux zones de basses pressions.

Le jeu des variations de pression aux différents niveaux de l'atmosphère peut s'interpréter, au moins qualitativement, par le déplacement des surfaces frontales. Ce déplacement remplace des masses d'air froid par des masses d'air chaud moins denses ou inversement. En faisant abstraction de l'effet de divergence-convergence, on explique ainsi assez souvent les variations de pression associées.

Enfin, bien que la surface frontale possède une stabilité dynamique d'ensemble, certaines oscillations se révèlent possibles. Ces oscillations présentent des longueurs d'onde de plusieurs centaines de kilomètres. Leur sont liés des affaiblissements de pression dans les régions où l'air chaud vient remplacer l'air froid, ou des renforcements de pression là où l'air froid repousse l'air chaud. Il se développe alors des centres de basses pressions, et quelquefois de hautes pressions, associées à de grands tourbillons.

Cette théorie morphologique des discontinuités n'a pas réussi à s'insérer complètement dans les conceptions numériques de la météorologie moderne. Il y a cependant lieu de la conserver pour rendre compte de phénomènes que les conceptions numériques ne prennent en considération que très indirectement.

Photo Agence TASS

En Antarctique, un météorologiste vérifie un actinomètre utilisé pour l'étude du rayonnement solaire.

Un budget thermique équilibré

Nous avons beaucoup parlé de la température, différenciant toutefois cette notion de celle de « réserve thermique ». Bien que n'agissant que de façon indirecte, ce sont les réserves thermiques qui, pourtant, conditionnent le fonctionnement de l'atmosphère. Au premier chef, parmi les facteurs qui peuvent les affecter, nous devons parler du rayonnement. Il caractérise les rapports énergétiques de notre planète avec le cosmos.

Un rayon de soleil nous fournit l'idée la plus directe du rayonnement. Indépendamment de la bonne humeur qu'il apporte, ce rayonnement fournit de la chaleur aux surfaces qui le reçoivent, d'autant plus que son incidence est plus grande. Si les surfaces réceptrices présentent un grand pouvoir réflecteur, le rayonnement reçu n'est pas absorbé, il est retourné vers l'espace. C'est le cas de la surface supérieure des nuages qui diffuse la quasi-totalité du rayonnement solaire. Suivant son revêtement (océans, régions arides, végétation sèche ou verte, banquises couvertes de neige),

la surface du sol présente des pouvoirs réflecteurs variables et absorbe plus ou moins le rayonnement que les nuages ont laissé passer. Dans ces conditions, le sol se réchauffe plus ou moins, mais il ne tarde pas à céder cette chaleur à l'atmosphère, soit de façon directe, par échauffement de la couche d'air voisine (ce qui engendre des mouvements convectifs propageant la chaleur reçue dans la masse atmosphérique), soit d'une façon indirecte, en utilisant cette chaleur pour évaporer l'eau des océans ou celle que la végétation pompe dans le sol. La chaleur ainsi utilisée est restituée en altitude lors de la condensation formant les nuages.

Mais le Soleil n'est pas la seule source de rayonnement. Il existe un rayonnement invisible émis par l'atmosphère et le sol.

La surface de la Terre émet du rayonnement, d'autant plus qu'elle est plus chaude ; d'un point à l'autre de la Terre les variations de température n'étant cependant pas considérables (dans la gamme des températures absolues), ce rayonnement peut être considéré comme constant.

L'atmosphère, tout au moins par certains de ses constituants (vapeur d'eau, nuages), émet aussi un rayonnement vers l'espace et le sol. Le calcul en est assez délicat, car il dépend non seulement des quantités très variables de vapeur d'eau et de nuages, mais encore de la répartition de la température dans ces masses rayonnantes, c'est-à-dire, en fait, de la répartition de la vapeur d'eau et des nuages avec l'altitude.

Les variations de ce rayonnement atmosphérique ont une importance assez considérable sur la température du sol. C'est ainsi que les prévisions de gelée au sol ou au voisinage du sol nécessitent en général une estimation assez précise de ces phénomènes.

D'un point de vue global, notre planète émet autant de rayonnement invisible qu'elle en reçoit sous forme visible du Soleil. Si elle recevait du Soleil plus de rayonnement qu'elle n'en émet, elle se réchaufferait ; dans le cas contraire elle se refroidirait. Dans l'un et l'autre cas, ce réchauffement ou ce refroidissement auraient tendance à modifier l'émission de rayonnement invisible dans le sens convenable pour réaliser l'équilibre de la planète. Nous avons donc encore ici un phénomène d'équilibre. Compte tenu de la puissance d'émission du Soleil et de la distance Terre-Soleil, il est possible de calculer la température moyenne superficielle de notre planète susceptible de réaliser cet équilibre radiatif. Celle-ci est de + 7 °C. Pour Mercure, qui est plus proche du Soleil, on trouverait + 177 °C, et pour Neptune, qui est plus éloignée, — 222 °C.

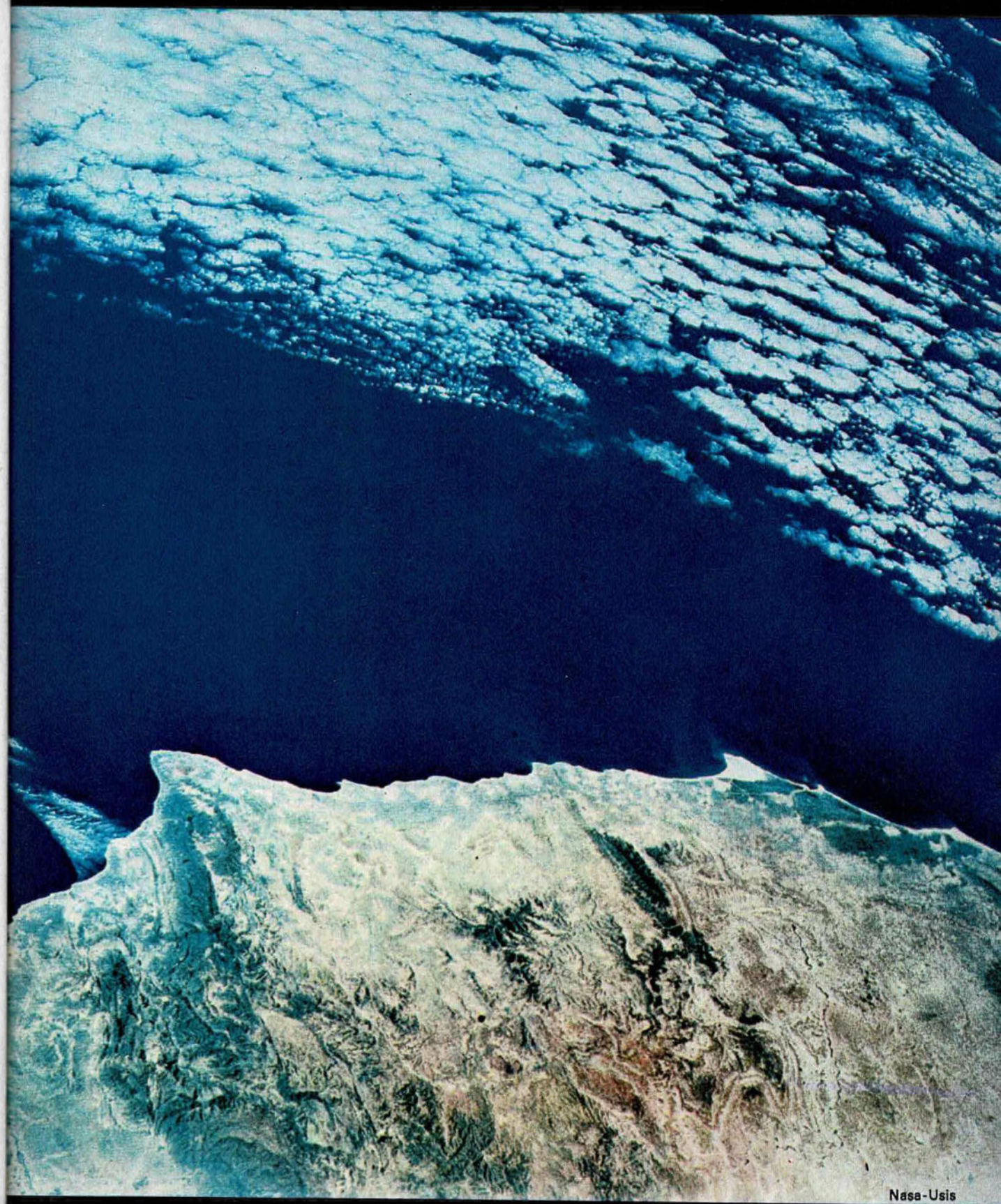
Une consommation de néguentropie

Si la planète Terre est en équilibre radiatif global, cet équilibre n'est cependant réalisé ni localement, ni instantanément. La nuit, par exemple, le rayonnement solaire est nul et il y a perte radiative (la température du sol diminue jusqu'au lever du Soleil qui se trouve être le moment du minimum de température, à moins que des apports d'air plus ou moins chaud viennent, par advection horizontale, modifier cette évolution).

Le cycle de vingt-quatre heures est cependant suffisamment rapide pour que ces variations n'affectent que les couches atmosphériques au voisinage du sol ou, au contraire, les régions très élevées de l'atmosphère. Celles-ci ont en effet une réaction particulière devant les phénomènes de rayonnement.

Le déséquilibre géographique du bilan de rayonnement affecte, par contre, considérablement le fonctionnement de l'atmosphère. En moyenne, les régions équatoriales reçoivent par le rayonnement plus de chaleur qu'elles n'en émettent, tandis que les régions polaires émettent plus de rayonnement qu'elles n'en reçoivent. La latitude où l'équilibre est approximativement réalisé se situerait à la pointe Sud de l'Italie. Exprimé d'une autre façon, ceci signifie que les régions équatoriales sont moins chaudes tandis que les régions polaires sont plus chaudes que ce que l'on devrait attendre pour un équilibre radiatif réalisé localement. Un mode de refroidissement et de réchauffement autre que le mode radiatif doit donc exister, et ce mode doit être équilibré pour l'ensemble de la planète. Il s'agit en fait de transferts de chaleur de l'équateur vers les pôles. Nous pourrions penser à la diffusion thermique dans le sol ou dans l'atmosphère entre équateur et pôles, mais les valeurs connues des coefficients de diffusion sont beaucoup trop faibles pour en rendre compte. Il faut envisager des mécanismes beaucoup plus énergiques. Ceux-ci sont réalisés par des mouvements de masses qui véhiculent des réserves thermiques entre pôles et équateur. Ceci est effectué en partie par les océans mais, d'une façon plus considérable, par l'atmosphère.

Il s'agit, en fait, d'une véritable convection thermique horizontale entre l'équateur et les pôles, analogue à la convection thermique verticale qui véhicule la chaleur vers la masse atmosphérique lorsque le sol est chauffé par le Soleil. Les chaleurs de vaporisation et de condensation de l'eau participent aussi à ces *transferts méridiens*. La vapeur d'eau produite dans les régions chaudes de la planète va se condenser dans les régions plus tempérées. Nous voyons ainsi apparaître une des raisons



Nasa-Usis

IL Y A DEJA PLUSIEURS ANNEES, LES ASTRONAUTES DU PROGRAMME GEMINI RAPPORTERENT DE NOMBREUX DOCUMENTS TELS QUE CELUI-CI, OU APPARAISSENT LES COTES SUD DU MAROC ET, AU LARGE, UNE COUVERTURE NUAGEUSE ASSEZ DENSE.

principales de l'agitation de notre atmosphère. Pour fonctionner, l'atmosphère n'a pas besoin de recevoir de la chaleur de l'extérieur ; elle a par contre besoin de recevoir, et par conséquent de consommer, une autre grandeur définie par la thermodynamique, la *néguentropie* (entropie affectée d'un signe négatif).

En chaque région d'un système thermodynamique qui reçoit ou perd de la chaleur, la variation d'entropie est la quantité de chaleur (positive ou négative) reçue, divisée par la température absolue à laquelle cette chaleur est reçue. La température « valorise » ainsi la chaleur reçue. Si la température est basse, le gain d'entropie est élevé. Si la température est élevée, le gain d'entropie est faible. Supposons le bilan thermique du système thermodynamique équilibré, ce qui est le cas de l'atmosphère. A forte température, la quantité de chaleur reçue est associée à une faible entropie reçue ; la même quantité de chaleur est émise à température plus faible, mais cette émission correspond à une perte élevée d'entropie. Il y a donc dans l'ensemble perte d'entropie, ou gain de néguentropie. Ainsi, l'atmosphère consomme de la néguentropie que lui fournit l'extérieur. Cette consommation lui permet d'entretenir son agitation continuelle. Bien que l'image d'une machine thermique soit imparfaite (une machine thermique fournit du travail à l'extérieur, ce qui n'est pas le cas de l'atmosphère où il existe seulement une agitation plus ou moins ordonnée qui se transforme tôt ou tard, au sein même de l'atmosphère, en chaleur), on peut avec quelque raison, appliquer à l'atmosphère les conceptions relatives à ces machines, en particulier le théorème du rendement maximum de Carnot. La création d'énergie mécanique d'agitation sera assimilée au travail de la machine.

Dans ce cas, le travail produit est égal à la quantité de chaleur véhiculée de la chaudière vers le condenseur (exprimée en unités de travail) multipliée par le rendement, grandeur qui fait intervenir la différence de température entre chaudière et condenseur, et la température absolue moyenne du condenseur et de la chaudière.

Dans l'atmosphère, on peut très approximativement évaluer ce rendement à 1/10.

La convection équateur — pôles

Il reste à comprendre pourquoi le déséquilibre radiatif des pôles et de l'équateur est si grand et pourquoi la convection horizontale n'est pas déclenchée dès que ce déséquilibre commence à se manifester. Ceci nous conduit à analyser d'une façon plus fine les propriétés du fluide atmosphérique.

Dans les régions tempérées où l'équilibre radiatif est approximativement réalisé, le régime moyen des vents de notre planète est un régime d'Ouest. Nous avons vu que le vent d'Ouest augmentait avec l'altitude dans toute la troposphère, puisque les régions chaudes se situent du côté équatorial et les régions froides du côté polaire. Il y aura donc cisaillement du courant d'Ouest, cisaillement d'autant plus accentué que les différences de température pôles-équateur seront plus grandes.

Or la mécanique de tels courants fluides nous apprend que le courant n'est stable que pour des cisaillements réduits. Dans le cas contraire, le courant répond aux sollicitations qu'il subit, si petites soient-elles, en dérivant soit à droite, soit à gauche, et en formant des méandres qui s'isoleront en tourbillons. Dans ces conditions, des masses d'air situées initialement du côté équatorial seront rejetées vers les côtés polaires et, inversement, des masses d'air initialement situées dans les régions polaires seront rejetées vers l'équateur.

Caractérisé localement par des vents ayant une forte composante méridienne, c'est-à-dire soufflant soit du Nord soit du Sud et conduisant à des advections thermiques froides ou chaudes importantes, apportant des variations brusques de la température, ce phénomène aura pour effet de véhiculer de la chaleur de l'équateur vers les pôles ou du froid des pôles vers l'équateur, réduisant ainsi les différences de température pôles-équateur.

S'adaptant à ce nouveau régime, le courant d'Ouest des régions tempérées présentera un moindre cisaillement et retrouvera sa stabilité. Le temps sera alors caractérisé par des vents d'Ouest, doux et humides, dans nos régions. Pendant la période correspondante où les transferts méridiens de chaleur seront ralentis, les effets radiatifs toujours géographiquement déséquilibrés tenteront de reconstruire de fortes différences de températures pôles-équateur et les phénomènes analysés plus haut se reproduiront.

Le transfert de chaleur entre pôles et équateur n'est pas le seul phénomène susceptible d'expliquer le mouvement de l'atmosphère. Si l'atmosphère était en repos relatif par rapport au globe terrestre, elle serait cependant en mouvement par rapport à des repères absolus. En particulier, les masses d'air situées vers l'équateur tourneraient plus vite que les masses d'air situées vers les pôles. Dans leurs déplacements méridiens, causés par les phénomènes thermiques étudiés plus haut, les masses d'air équatoriales se dirigeant vers les pôles auraient tendance à tourner plus rapidement que la Terre elle-même. Le mouvement se présenterait comme un vent d'Ouest. Par contre,

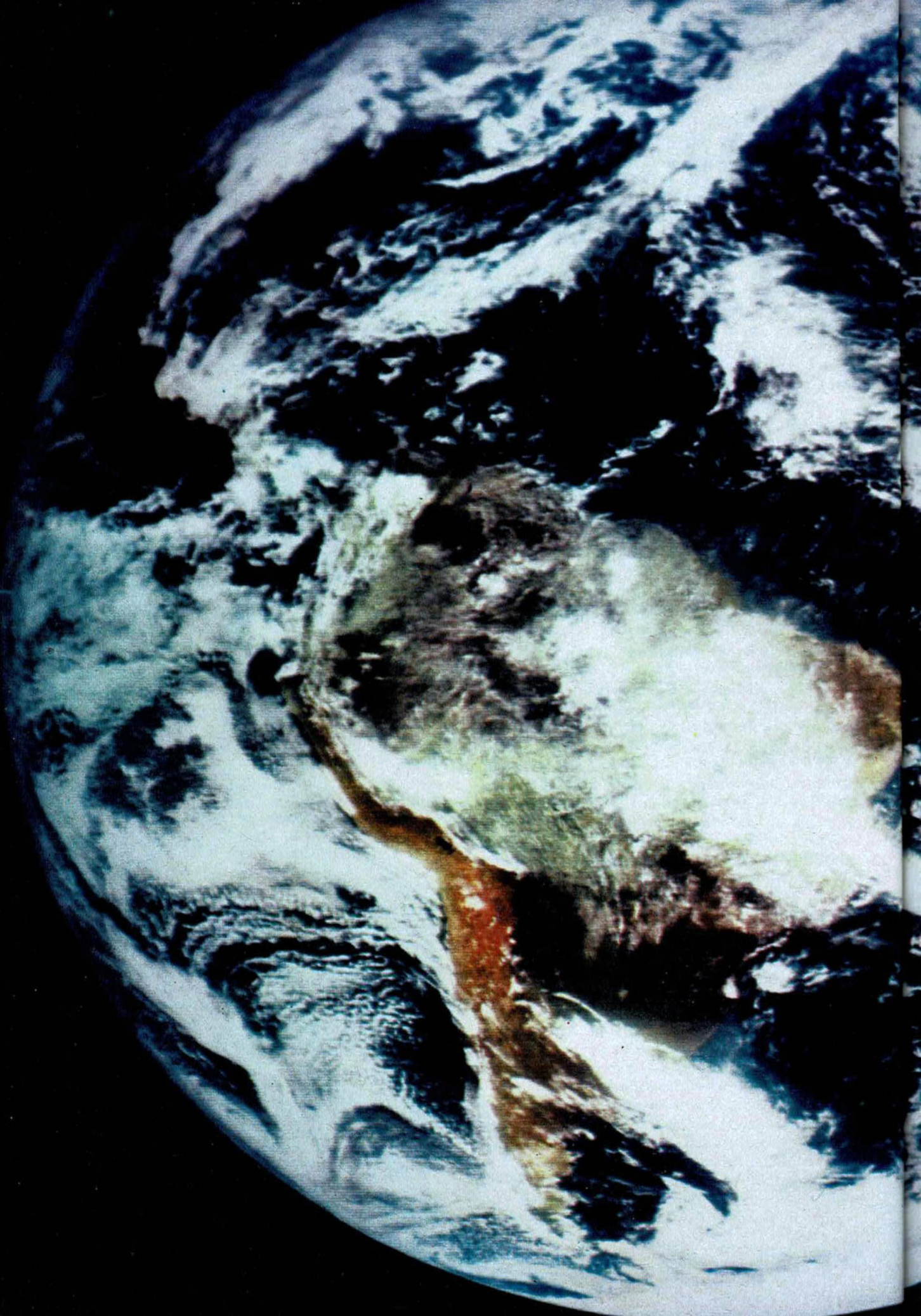
les masses d'air d'origine polaire déplacées vers l'équateur auraient tendance à tourner moins vite que la Terre et leur mouvement se présenterait comme un vent d'Est.
Tout ceci s'explique indépendamment du frottement exercé par la Terre, mais ce frottement existe. Il est cependant extrêmement mal connu. Actuellement il n'est pas possible de le prendre en considération autrement que par des procédés empiriques.
Si l'on comprend pourquoi l'atmosphère ne peut être en repos d'une façon globale, on comprend aussi que, tant que les frottements de l'atmosphère avec le globe solide, tant que les hétérogénéités des apports et des pertes de chaleur ne seront pas mieux connues, le calcul d'une évolution globale de l'atmosphère, nécessaire pour établir des prévisions pour des échéances du mois ou de la saison, ne pourra se faire d'une façon précise.

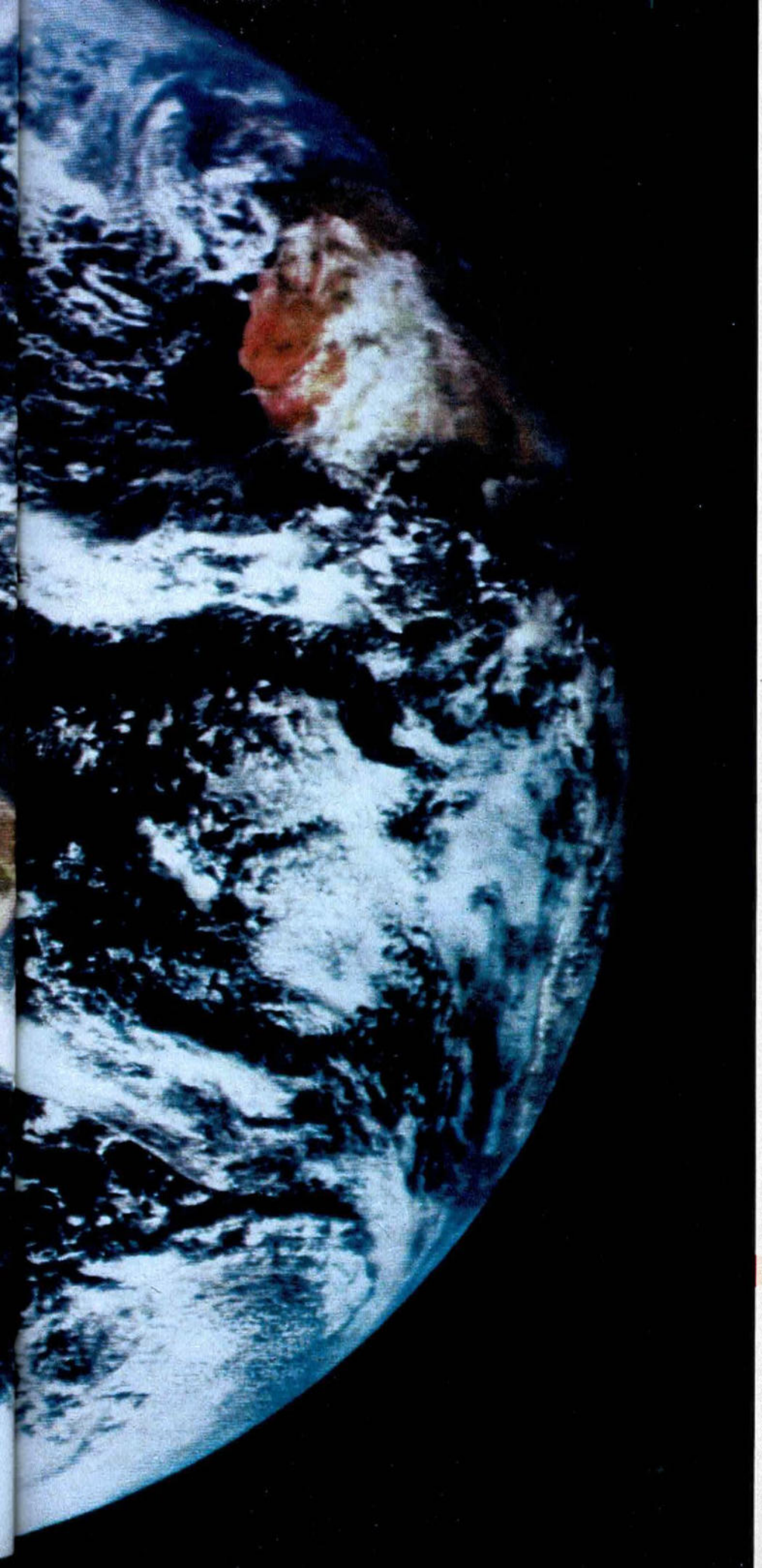
Une limite au déterminisme

Nous avons été obligés d'employer à plusieurs reprises le terme de stabilité et d'instabilité. Il s'est agi d'abord de la stabilité « statique » caractérisant la difficulté pour l'atmosphère de remettre en cause l'équilibre des masses d'air empilées les unes sur les autres. Il s'est agi ensuite de l'instabilité d'un courant fluide satisfaisant à un équilibre dynamique. Ces problèmes de stabilité et d'instabilité se retrouvent constamment dans toute l'étude de l'atmosphère et ils fixent les limites des calculs des évolutions.
Laissons se consumer une cigarette sur un cendrier dans une pièce calme. La fumée monte régulièrement sur une vingtaine de centimètres. Un peu plus haut, sa trajectoire devient plus capricieuse. Elle se dirige tantôt à droite, tantôt à gauche, ses déplacements irréguliers semblent répondre au moindre mouvement de l'air de la pièce.
Dans la région instable, les perturbations, si petites soient-elles, sont amplifiées, et la trajectoire exacte de la fumée n'est plus prévisible. On pourrait peut-être seulement prévoir l'enveloppe des trajectoires possibles.
Une situation analogue se présente souvent dans les écoulements atmosphériques. Stables dans certaines régions, ils sont bien déterminés par les causes que nous pouvons mettre en évidence. Instables dans d'autres, il serait nécessaire, pour les déterminer, de connaître avec une très grande exactitude toutes les causes de perturbation, si minimes soient-elles. Cela n'est pas possible, et l'évolution future de l'écoulement reste aléatoire.
Nos méthodes de prévisions actuelles sont essentiellement déterministes. Que l'écoulement soit stable ou instable, elles ne détermineront qu'une seule évolution possible. En particulier dans les domaines instables, l'évolution prévue sera choisie au hasard parmi toutes celles possibles. Dans un calcul, le hasard se manifeste de diverses façons. Il s'agit, par exemple, du simple fait qu'une division calculée dans une machine ne peut donner qu'un résultat approché, tantôt par défaut, tantôt par excès. Le résultat du calcul est ainsi affecté de petites perturbations qui seront résorbées lorsqu'il s'agit de la simulation d'un courant stable ; elles pourront au contraire engendrer des évolutions variées si, à un moment donné et dans une région donnée, les courants simulés sont instables. L'atmosphère réelle réagit d'une façon analogue, mais il y a fort peu de chances pour que les aléas du calcul se présentent de la même façon et dans le même sens que les aléas physiques rencontrés dans la nature. Est-ce à dire que nous devons abandonner tout espoir d'une détermination future de l'évolution ? Certainement non ; il faut seulement limiter nos prétentions. Nous avons vu, par exemple, dans l'explication de l'instabilité du courant zonal des régions tempérées, qu'il n'est pas impensable de pouvoir déterminer le moment où l'instabilité se présentera. A partir de ce moment, le type de temps sera modifié dans un sens bien caractérisé. Mais les trajectoires exactes nous échapperont, ainsi que la localisation précise des phénomènes. C'est en songeant à ce type de limitations qu'il faut envisager l'extension des échéances de la prévision du temps. Il nous faut aussi modifier notre façon de comprendre l'atmosphère, en utilisant, pour décrire son évolution sur des périodes étendues, des concepts différents de ceux utilisés pour la description au jour le jour.
Et c'est un point de vue qui n'est pas toujours accepté facilement.

Guy DADY

Photo Rapho





EN ORBITE STATIONNAIRE AU-DESSUS DU BRESIL, L'ENGIN ATS III PUT, DES 1967, OBTENIR ET TRANSMETTRE LES PREMIERES PHOTOS EN COULEUR DE NOTRE GLOBE ENTIER ET DE LA MINCE PELLICULE QUE L'ATMOSPHERE CONSTITUE A SA SURFACE. CELLE-CI EST BRASSEE EN TOUS SENS PAR COURANTS ET TOURBILLONS, QUE LA COUVERTURE NUAGEUSE VISUALISE.

Nasa

ACQUISITION DES DONNÉES

Pour appliquer, en vue de la prévision météorologique, les lois mécaniques et thermodynamiques qui régissent l'évolution de l'atmosphère, il faut au départ caractériser celle-ci par les valeurs numériques de ses principaux paramètres physiques. Pour l'acquisition objective de ces données des instruments de mesure spécialisés ont été conçus et réalisés.

Destinées à l'origine à un usage immédiat, les premières mesures ont porté sur les températures de l'air et du sol, sur la quantité des précipitations, c'est-à-dire la hauteur d'eau parvenant au sol sous forme de pluie ou, éventuellement, de neige et de grêle. L'affinement des connaissances et la multiplication des besoins ont justifié ensuite l'extension des mesures à l'humidité de l'air, à la pression atmosphérique, à la vitesse et à la direction du vent.

Le développement de l'aéronautique a récemment canalisé les recherches dans les domaines concernant les nuages et surtout la visibilité. En même temps, les progrès en matière d'hydrologie et d'agriculture obligeaient à la mise au point d'appareils simples de mesure de l'évaporation et de l'évapotranspiration (quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par les plantes).

Mais, simultanément, les champs d'observation devaient pouvoir s'étendre et les mesures être effectuées à distance, d'où la mise en place de *télémesures* donnant même naissance aux *stations automatiques*, capables non seulement d'effectuer automatiquement les mesures, mais aussi de les chiffrer, de les coder et, éventuellement, de les transmettre par fil ou radio.

Les premières stations automatiques simplifiées ont vu le jour sous la forme des *radiosondes* transmettant cycliquement des mesures de température, de pression et même d'humidité, effectuées en altitude. Elles furent d'abord assurées jusqu'à quelques milliers de mètres grâce à des cerfs-volants ou des ballons, puis jusqu'à 25 ou 30 km, à l'aide des ballons libres actuels, ou même jusqu'à 60 ou 80 km en utilisant des fusées. Les méthodes de radiosondage, toujours en évolution, font l'objet de recherches permanentes.

L'observation au sol

Le terme « observation » renferme la notion d'examen visuel, et il est vrai que l'observation météorologique, considérée comme la description de l'ensemble des éléments du climat, conserve encore en partie ce caractère subjectif. C'est par exemple le cas de la nébulosité ou de l'identification des nuages. Mais ce n'est plus là l'essentiel de l'observation météorologique qui comprend de plus en plus de mesures effectuées sur des grandeurs physiques.

Une station météorologique moderne tend à devenir une centrale de mesures et le rôle de l'observateur, s'il nécessite encore de scruter le ciel, consiste de plus en plus à transcrire les indications de multiples appareils, de les

Agence Tass

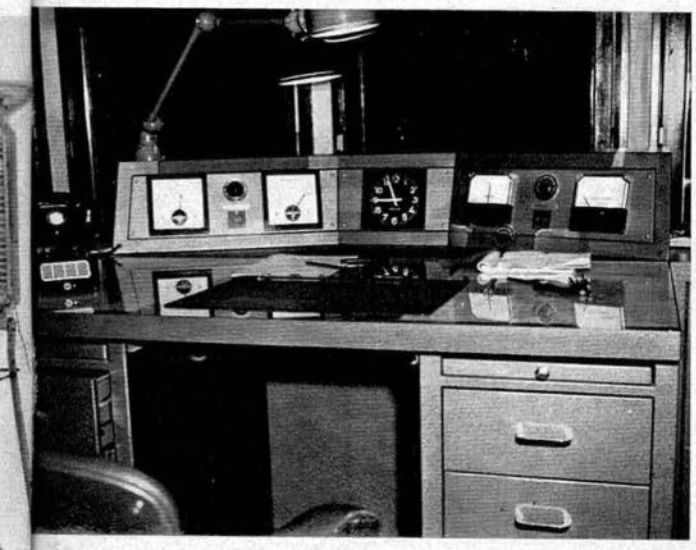
Par ailleurs, le *radar* a permis tout d'abord la mesure du vent en altitude à l'aide de réflecteurs enlevés par ballons. Son évolution actuelle est orientée principalement vers la détection et la localisation des échos naturels que donnent les gouttelettes d'eau et la pluie, et même vers la télémesure de l'intensité des pluies sur de vastes surfaces de plusieurs milliers de km². De même, l'exploitation de *satellites artificiels* permet de couvrir des zones encore plus étendues, dépassant un million de km², sous une forme non seulement qualitative (photographie des nuages), mais aussi quantitative (mesure des flux radiatifs), à l'échelle de notre planète. L'apparition de ces engins devrait permettre des progrès sensibles en matière de météorologie car, théoriquement comme pratiquement, c'est bien cette dimension planétaire qui doit être appréhendée si l'on veut tenter de comprendre le fonctionnement global de cette immense machine thermodynamique que constitue la Terre et son atmosphère.

Tous les phénomènes météorologiques ne sont que la manifestation des mécanismes thermodynamiques mis en jeu pour transférer, entre le globe terrestre et l'atmosphère qui le surmonte, d'immenses énergies sous des formes très diverses, faisant principalement appel aux échanges radiatifs et au cycle de l'eau. D'une manière générale, si le facteur eau reste ainsi très important, les mesures de *rayonnements* sont fondamentales et tendent aujourd'hui à se développer considérablement, aussi bien pour le rayonnement solaire, seule source d'énergie de notre planète, que pour le rayonnement terrestre de grandes longueurs d'ondes, seul résidu des transformations d'énergie réalisées sur la Terre.

Le travail de synthèse consécutif au recueil de ces multiples données de mesure, et nécessité par leur exploitation à l'échelle mondiale et régionale, doit aussitôt donner lieu à une série d'analyses correspondant à des échelles de temps et d'espace toujours plus détaillées, afin d'aboutir à la description des manifestations météorologiques locales, celles que recherche en fait l'utilisateur. Cette nouvelle démarche, totalement opposée à la synthèse initiale, est indispensable dans toute science pour s'adapter aux applications pratiques, mais elle revêt une particulière importance en météorologie.

Dans ce sens, si l'utilisation d'ordinateurs de grande puissance a seule permis de commencer une exploitation synthétique des données, elle reste également nécessaire dans la phase d'adaptation analytique des résultats aux conditions locales. De même, si l'apparition des satellites artificiels a, en complétant les méthodes classiques d'observation ou les techniques élaborées d'acquisition des données, constitué un grand pas pour la météorologie globale, elle ne peut les supplanter, ni aujourd'hui ni dans l'avenir.

Ch. PERRIN de BRICHAMBAULT



Du relevé sur le terrain des indications portées par les appareils de mesure à la centralisation des données par télémesure sur le pupitre de l'observateur, deux étapes du perfectionnement des techniques d'acquisition des données... La photo de gauche se rapporte à une station soviétique implantée en Arctique.

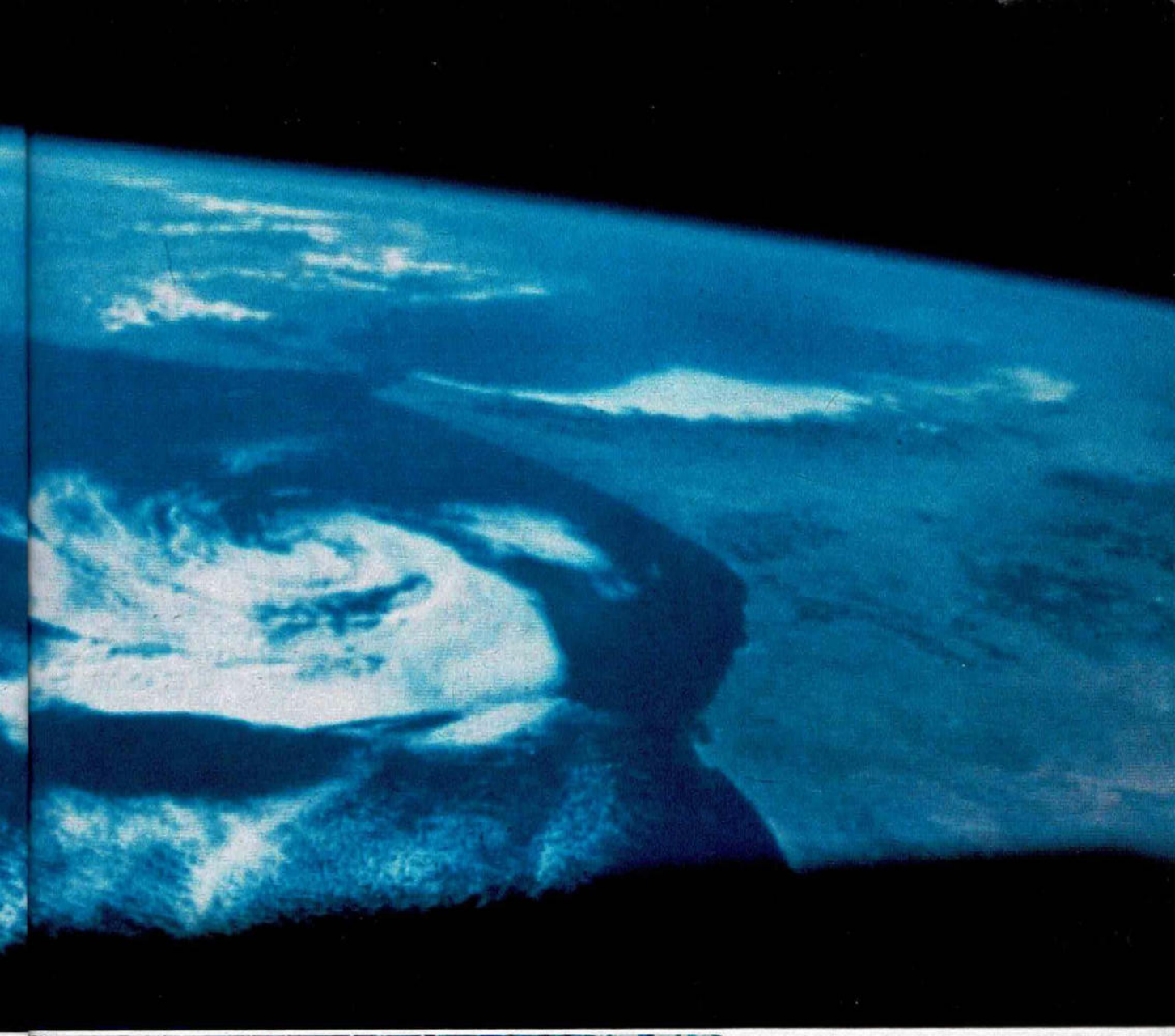
mettre sous forme codée, admissible par les circuits de transmission. Dans certains cas, comme on le verra dans le paragraphe traitant de l'acquisition automatique des données, cet intermédiaire humain a déjà disparu. On s'attachera donc, dans ce qui suit, après quelques considérations sur les buts et les conditions de l'observation au sol, à décrire les techniques de mesure plutôt que les moyens de qualification subjective du temps ou du climat.

Observations synoptiques et observations spéciales

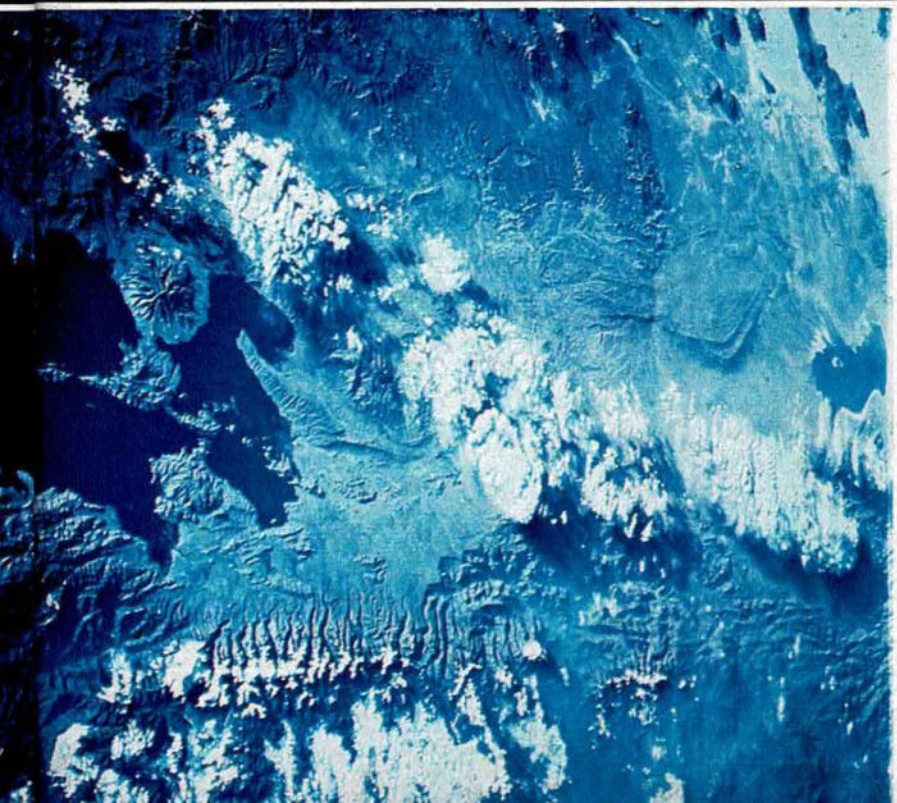
Selon les buts poursuivis, les observations au sol peuvent être classées en deux catégories. *L'observation synoptique* est destinée à déterminer par interpolation, à partir de mesures effectuées en un nombre limité de points sur une aire géographique étendue, le champ au niveau du sol, à un instant donné, des diverses grandeurs météorologiques : pression atmosphérique ou champ thermique, par exemple. Cette catégorie d'observation sert princi-

A PROXIMITE
DU DETROIT DE GIBRALTAR,
AU LARGE DES COTES
AFRICAINES,
UNE VASTE FORMATION
TOURBILLONNAIRE.

SURFACES D'EVAPORATION
ET RELIEFS ELEVES
VONT INFLUENCER LE
FONCTIONNEMENT DE LA
MACHINE ATMOSPHERIQUE
ET DETERMINER
LARGEMENT LE CLIMAT.
LE DOCUMENT A DROITE
MONTRE LA CORDILLIERE
DES ANDES ET LE
LAC TITICACA,
PHOTOGRAPHIES LORS
D'UN VOL GEMINI.



Nasa



Nasa-Usis

Une station d'observation et son parc à instruments. Les normes d'agencement sont assez précises. On remarque ici deux abris, l'un pour essais de matériels. A droite, des appareils de mesure de la pluie.

palement à l'analyse des phénomènes considérés à grande échelle et à l'élaboration de prévisions générales. L'ensemble des points d'observations est appelé « réseau synoptique ».

L'observation spéciale est destinée à déterminer, pour un besoin d'intérêt purement local, certains paramètres météorologiques, tels que, par exemple, la vitesse et la direction du vent au voisinage de la piste d'un aérodrome ou dans une vallée traversée par un téléphérique, la température et l'humidité de l'air au milieu d'une surface cultivée.

La différence essentielle entre ces deux types d'observation est l'échelle de temps et d'espace à laquelle les phénomènes doivent être considérés. Dans le cas de l'observation synoptique, une grandeur mesurée à un instant donné en un point particulier doit représenter correctement la valeur moyenne de cette grandeur mesurée en tous points d'une zone de plusieurs centaines de kilomètres carrés entourant le point d'observation. On doit donc choisir la zone d'observation de telle façon que son relief, sa géologie, son hydrologie, sa couverture végétale, sa densité d'habitation ne constituent pas des conditions trop particulières.

L'emplacement des capteurs dans cette zone doit être défini en fonction de l'influence possible de l'environnement immédiat sur les grandeurs mesurées et une certaine normalisation est donc nécessaire. En régions tempérées, la majorité des mesures sont effectuées au-dessus d'une étendue gazonnée plane de quelques centaines de mètres carrés, située à l'écart des obstacles qui pourraient influer sur le vent, la durée d'insolation, le rayonnement solaire et, par voie de conséquence, sur la température et l'humidité de l'air, sur l'évaporation et les précipitations.

L'enclos destiné aux mesures, ou *parc météorologique*, est généralement placé assez loin au sud du bâtiment technique et à bonne distance des arbres et des constructions. Il va sans dire que la stricte observance de ces conditions n'est pas toujours possible et que l'extension des zones urbaines, par exemple, remet quelquefois en question la représentativité des stations météorologiques.

Pour les observations spéciales, par contre, il n'est pas nécessaire, et il est même quelquefois contre-indiqué, de chercher à éviter les facteurs d'influence locaux. Si l'on imagine, par exemple, que le vent au niveau d'une piste d'aérodrome est influencé par l'orographie (colline ou vallée), il est évident, pour les besoins de l'aéronautique, qu'il convient de fournir la direction et la vitesse du vent mesurées précisément en ce point.

En ce qui concerne l'échelle de temps, la valeur de la vitesse du vent retenue pour les fins synoptiques est la moyenne de cette grandeur pendant les 10 minutes précédant l'observation, tandis que, pour des fins aéronautiques, il est recommandé d'effectuer cette moyenne sur 2 minutes seulement, ou même d'enregistrer les valeurs instantanées si l'on veut déterminer les rafales.

L'abri météorologique

Pour effectuer certaines mesures, il importe de protéger les capteurs des intempéries et des effets radiatifs. C'est le cas des mesures de température, d'humidité de l'air et d'évaporation. Les capteurs sont donc placés dans un abri construit en matériau isolant (bois ou matière plastique), posé sur pieds à 1,50 m du sol, peint en blanc afin de n'absorber qu'une faible proportion du rayonnement solaire, et de masse calorifique aussi réduite que possible.

La circulation de l'air est assurée naturellement, aussi est-il nécessaire que les parois latérales soient formées de persiennes agencées de telle sorte que la perméabilité au vent soit maximale, mais que le rayonnement solaire ne puisse pénétrer qu'après un nombre de réflexions diffuses suffisant pour que l'échauffement des capteurs soit négligeable. Inversement, les capteurs ne peuvent rayonner directement vers l'espace durant la nuit et, grâce aux qualités isolantes du matériau qui constitue l'abri, la partie interne des parois demeure à une température peu différente de celle de l'air. Une ventilation verticale peut aussi être obtenue grâce à des ouvertures en chicane pratiquées dans le plancher et le toit

de l'abri. La vitesse de ventilation dans l'abri est toujours inférieure à la vitesse du vent à l'extérieur ; une certaine constante de temps due à l'abri lui-même doit donc être ajoutée à la constante de temps propre des capteurs qui y sont placés.

La température de l'air

On a remarqué depuis longtemps que la turbulence de l'air provoque des variations irrégulières de sa température dont l'amplitude peut atteindre plusieurs degrés en des temps très brefs. Des écarts de même ordre peuvent être observés au même instant entre deux points distants de quelques mètres. Il n'est donc pas raisonnable de chercher à mesurer la valeur instantanée d'une température à mieux que 0,5 °C près. Une précision meilleure n'aurait de sens que si l'on effectuait la moyenne de la température pendant une durée de plusieurs minutes. En fait, les capteurs ont une constante de temps telle que les variations rapides de température sont fortement atténuées et que les températures relevées peuvent déjà être considérées comme des températures moyennes.

La dotation habituelle d'une station comprend :

— un thermomètre à mercure gradué en degrés ou demi-degrés C qui est lu à chaque observation,

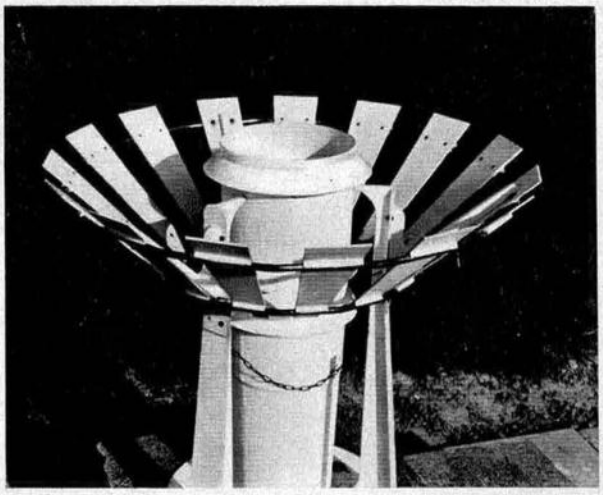
— un thermomètre à maximum lu et réamorcé une fois par jour,

— un thermomètre à minimum lu et réamorcé une fois par jour,

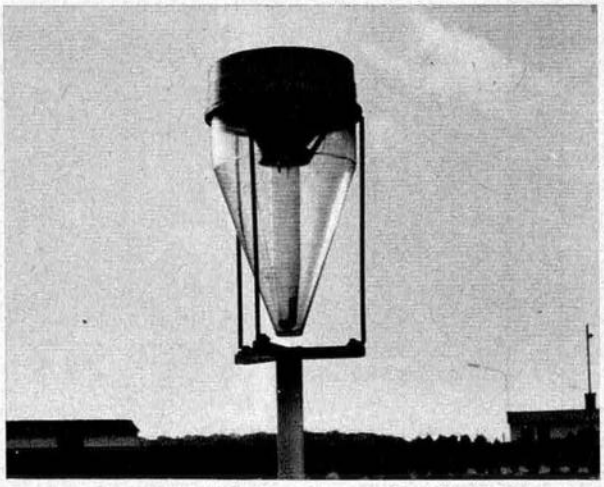
— un thermomètre à bilame et mouvement d'horlogerie qui enregistre la température en permanence.

Certaines stations sont équipées de matériel plus élaboré comprenant plusieurs sondes de température à résistance de platine dont l'une est placée sous l'abri, les autres servant à la mesure au niveau du sol ou à diverses profondeurs dans le sol. Suivant les cas, on aura un indicateur multivoie commuté manuellement aux diverses sondes ou un enregistreur multivoie, commuté successivement aux diverses sondes de façon automatique. Cette partie de l'ensemble est évidemment installée dans le bâtiment technique. Les températures extrêmes mesurables avec ces instruments sont de — 50 et + 70 °C et leur précision de ± 0,2 à 0,3 °C dans la gamme de — 20 à + 40 °C.

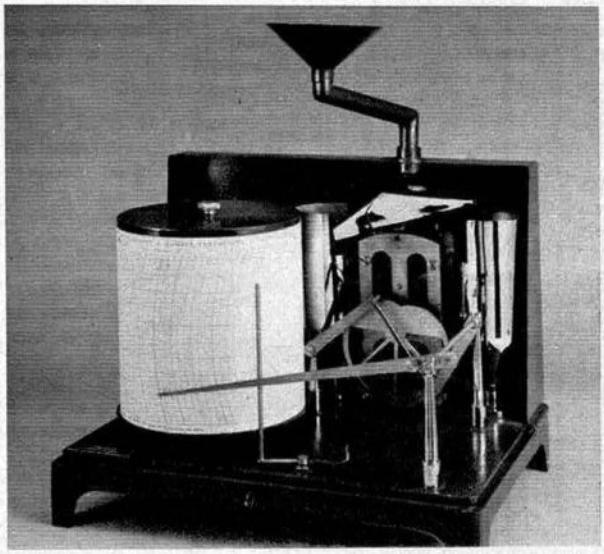
Rappelons que les températures extrêmes sous abri relevées en France sont comprises entre — 30 et + 45 °C pour les stations de plaine, et que les extrêmes mondiaux absolus sont de l'ordre de — 70 °C (Sibérie) et + 50 °C (Sahara).



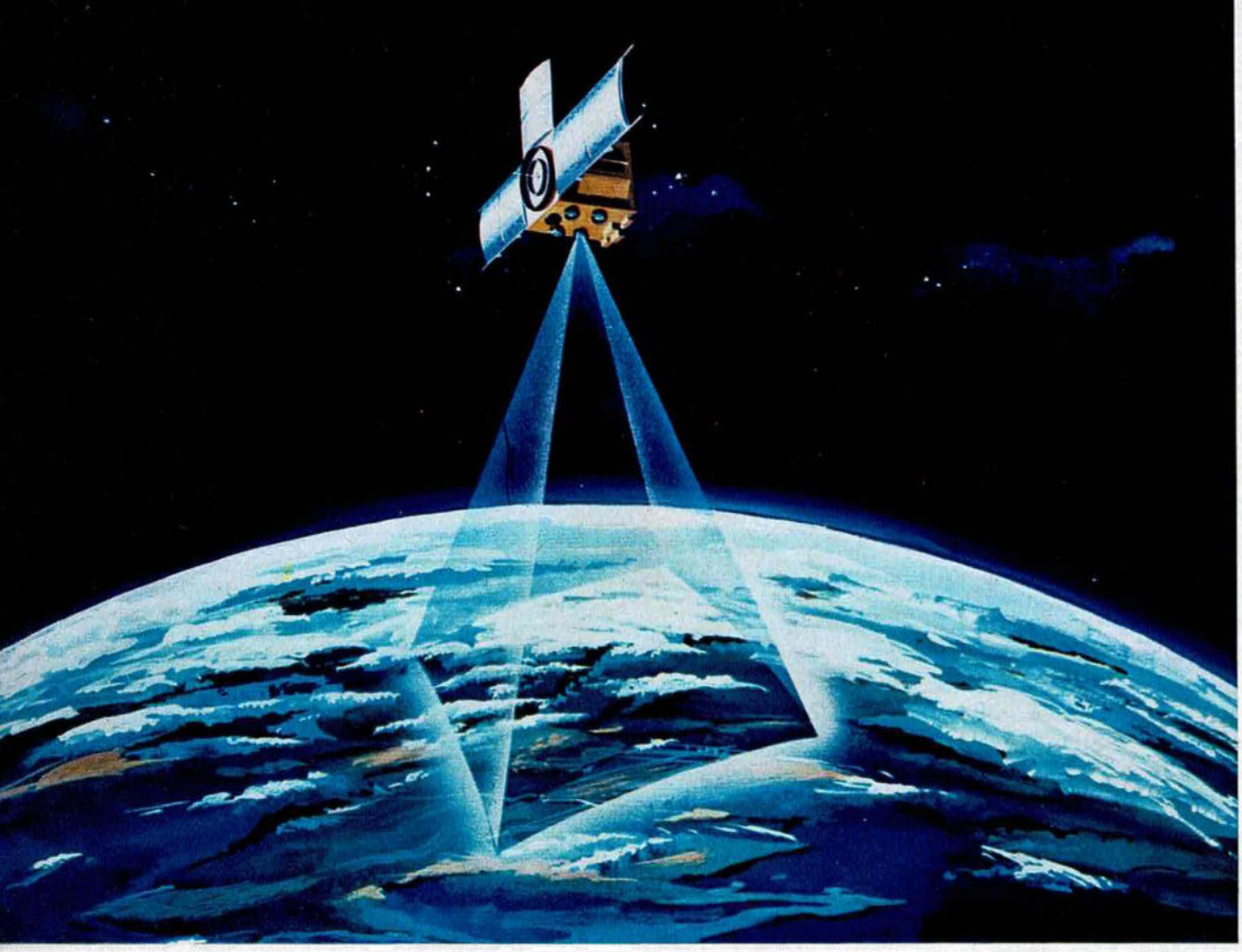
Un pluviomètre classique, avec écran anti-évaporation. Ce type d'instrument implique des transvasements pour mesurer la hauteur d'eau recueillie.



De conception plus moderne, le pluviomètre en plastique moulé réduit les pertes d'eau. L'éprouvette est placée directement sous le cône de réception.

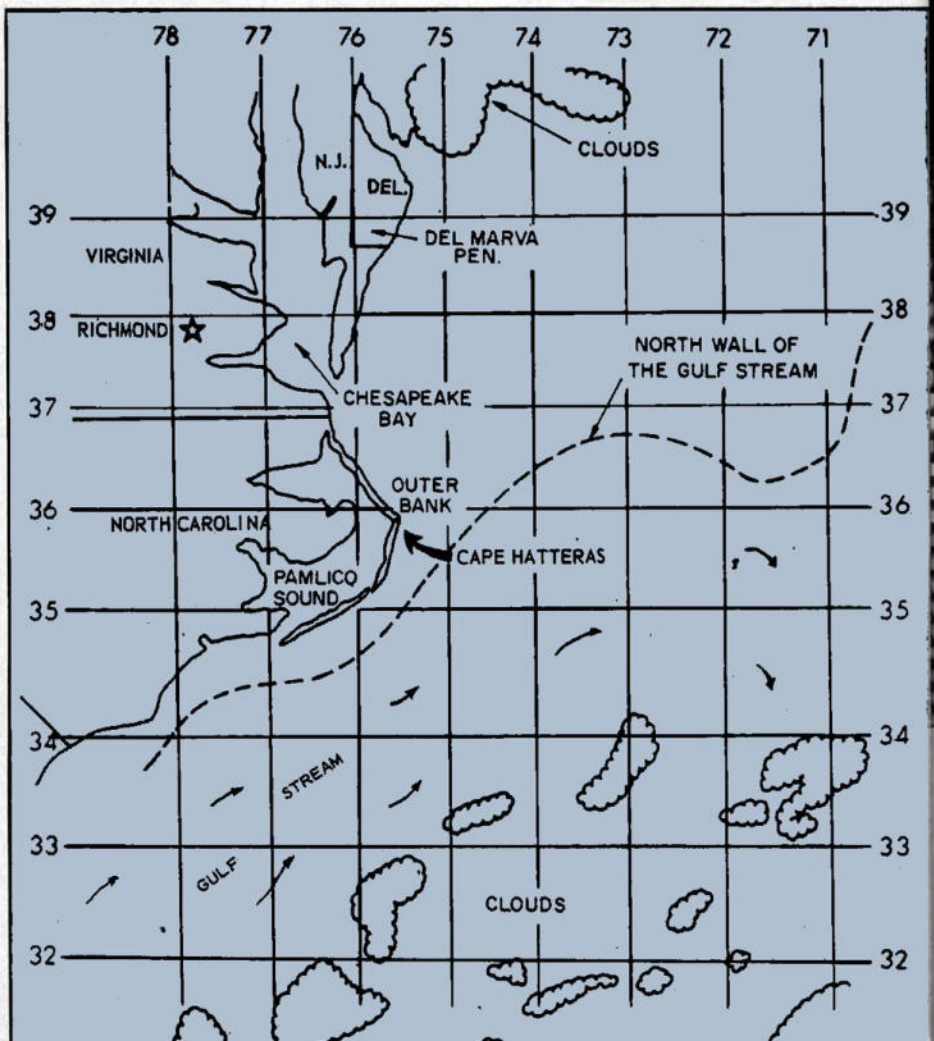


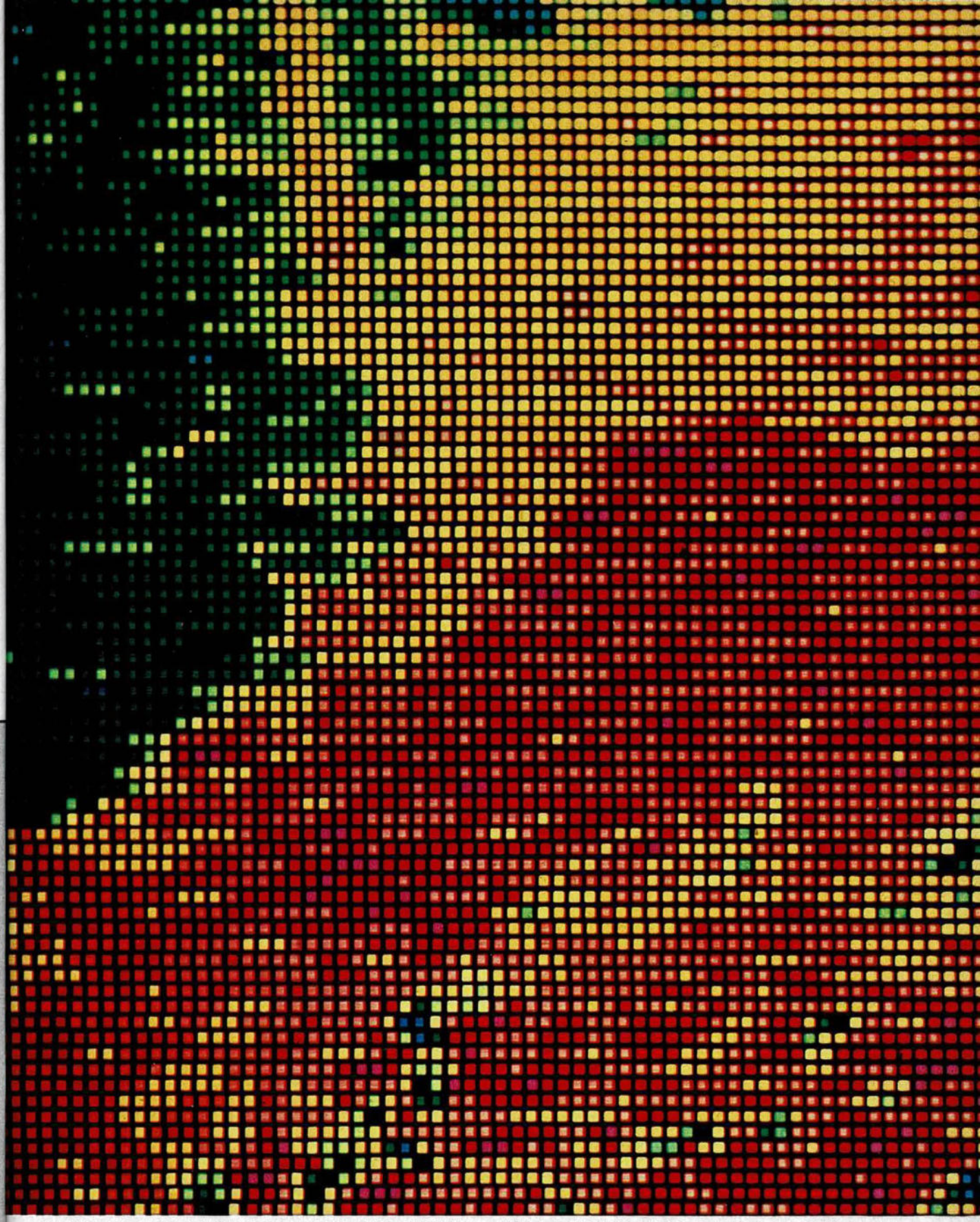
Le pluviographe intègre les précipitations sur une certaine durée. Sous l'entonnoir, un auget double basculant est à l'origine du mouvement du style.



Nasa-Usis

PREMIER SATELLITE METEOROLOGIQUE DE LA SERIE ITOS, TIROS M (DEVENU APRES SON LANCEMENT ITOS 1) A ETE LANCE LE 23 JANVIER DERNIER. EQUIPE DE CAMERAS ET DE RADIOMETRES INFRAROUGE, PLACE SUR UNE ORBITE QUASI-POLAIRE A 1 500 KM D'ALTITUDE, IL REALISE EN 24 H UNE COUVERTURE COMPLETE DE L'ATMOSPHERE ET DE LA SURFACE TERRESTRE.





REALISEES SUR DE VASTES AIRES OCEANIQUES PAR LES RADIOMETRES EMBARQUES DES SATELLITES ARTIFICIELS, LES MESURES DE TEMPERATURE PERMETTRONT UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES ECHANGES OCEANS-ATMOSPHERE (L'INTERET DE CES MESURES EST TRES GRAND DANS D'AUTRES DOMAINES AUSSI). POINT PAR POINT (PAR UNITES DE SURFACE DE 5 MILLES CARRES...), ON A AINSI MESURE LES TEMPERATURES DANS LA ZONE DU GULF-STREAM, AU VOISINAGE DE LA COTE DES ETATS-UNIS. TRANSMISES AU SOL, TRAITEES PAR CALCULATEURS ET CONVERTIES EN « VALEURS » COLORIMETRIQUES, CES DONNEES ONT PERMIS D'ETABLIR UNE VERITABLE MOSAIQUE OU SE DESSINENT (EN ROUGE) LES LIMITES DU GULF-STREAM, LES EAUX PLUS FROIDES EN JAUNE, LES TERRES ET QUELQUES NUAGES EN VERT.

L'humidité atmosphérique

Les méthodes de mesure absolues de l'humidité de l'air sont peu nombreuses et impraticables ailleurs qu'en laboratoire ; les méthodes relatives sont multiples, rarement très précises et quelquefois complexes.

L'humidité de l'air au niveau du sol s'exprime habituellement, soit par la tension de vapeur d'eau dans l'air, soit par l'humidité relative définie comme 100 fois le rapport de la tension de vapeur d'eau mesurée à la tension de vapeur d'eau saturante à la température de l'air considérée. La tension de vapeur s'exprime en millibars et l'humidité relative en %.

On caractérise aussi l'humidité par la température du point de rosée : c'est la température à laquelle la tension de vapeur serait saturante, et elle se déduit de la tension de vapeur. La tension de vapeur d'eau en plaine est généralement comprise entre 1 et 20 mb dans les régions tempérées à climat océanique, tandis que l'humidité relative y est rarement inférieure à 30 %. Dans les régions tropicales semi-arides, la tension de vapeur peut descendre au-dessous de 4 mb, ce qui correspond, au moment du maximum de température, à des humidités relatives inférieures à 5 %. Elle peut, par contre, atteindre 30 mb dans les régions équatoriales.

La mesure de l'humidité de l'air est le plus souvent effectuée à l'aide du *psychromètre*, ensemble de deux thermomètres à mercure identiques, l'un servant à la mesure de la température de l'air, l'autre, dont le réservoir est recouvert d'une mousseline constamment alimentée en eau, indiquant une température inférieure ou au plus égale à la température de l'air. L'écart entre ces deux températures est fonction de l'humidité de l'air. Cette méthode de mesure est complétée par un *hygrographe à cheveu*, de même présentation que l'enregistreur de température et enregistrant directement l'humidité relative.

De nouveaux moyens de mesure, basés sur la variation de résistivité de diverses substances avec l'humidité ou sur les propriétés des solutions saturées de sels hygroscopiques, sont apparus au cours des 10 dernières années. Peu d'entre eux sont encore utilisables à des fins météorologiques, soit à cause de leur prix élevé, soit à cause de leur fidélité insuffisante.

Il faut toutefois signaler les *capteurs à sorption thermocontrôlée*, dont la mise en œuvre commencera prochainement dans les stations météorologiques françaises. Le principe de cet instrument est le suivant. La tension de vapeur d'eau au-dessus d'une solution aqueuse saturée d'un sel tel que le chlorure de lithium augmente avec la température de la solution ; lorsqu'elle devient supérieure à celle de l'air ambiant, la résistivité de la solution s'accroît rapidement. Si donc on fait passer dans cette solution un courant délivré par un générateur à tension constante, ce courant sera faible dès que la solution parviendra à la température correspondant à l'égalité des tensions de vapeur. Quand la solution tend à se refroidir, sa résistivité diminue, le courant augmente et la réchauffe par effet Joule. Ainsi la solution trouve-t-elle un état d'équilibre stable lorsque l'égalité des tensions de vapeur est réalisée. De la température que l'on mesure, on déduit la tension de vapeur de la solution, qui lui est liée par une loi simple, donc celle de l'air. La sonde thermométrique peut être reliée à un pont de Wheatstone asservi, directement gradué en températures du point de rosée. Une télémesure est donc facilement réalisable et la précision est de $\pm$ 0,5 °C dans l'intervalle — 12 °C à +25 °C.

Les précipitations

On recueille les précipitations dans un cône entouré d'une bague cylindrique à axe vertical définissant avec exactitude la surface de captation. Sous le cône de réception, percé d'un orifice, est disposé un seau dans lequel l'eau s'accumule.

L'appareil le plus simple (pluviomètre Association) est en zinc et muni d'une éprouvette graduée en hauteurs d'eau dans laquelle le seau est transvasé deux fois par 24 heures ou après chaque pluie.

Pour remédier aux principaux inconvénients de cet instrument (pertes d'eau par évaporation et transvasement), des pluviomètres en matière plastique ont été récemment construits. L'éprouvette graduée est placée directement sous le cône de réception, ce qui limite l'évaporation (grâce aux propriétés isolantes du matériau) et réduit les pertes d'eau par mouillage, tout transvasement étant évité dans la plupart des cas.

Les pluviographes, ou pluviomètres totalisateurs actuellement en service sont munis d'une surface de captation plus grande (2 000 cm²) et le volume d'eau recueilli est déterminé par pesée, à l'aide du système à augets basculeurs. Deux récipients accolés sont mobiles autour d'un axe horizontal. Lorsque l'un d'eux est en position haute, il est placé sous l'orifice d'arrivée d'eau et se remplit, tandis que l'autre est incliné de telle façon qu'il se vide très rapidement. Pour un poids d'eau de 20 g (ce qui représente 0,1 mm de pluie), l'auget placé sous l'orifice bascule et se vide tandis que l'autre vient le remplacer. A cha-

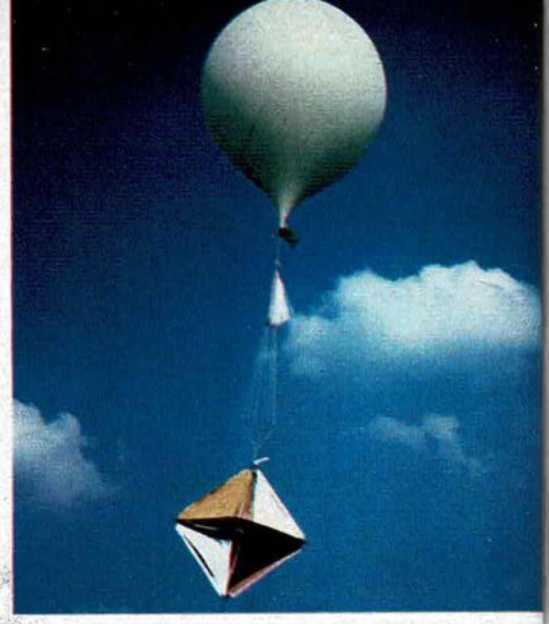
que basculement, un contact électrique se ferme et actionne un compteur électromécanique situé à distance.
Ces divers instruments peuvent présenter entre eux des différences systématiques (5 à 10 %) qui tiennent à l'influence de la forme et des dimensions des appareils et à la variation de sensibilité des instruments enregistreurs avec l'intensité de la pluie. Des études sont en cours en France et à l'étranger pour remédier à ces causes d'erreur.
Pour fixer les idées, rappelons que la hauteur moyenne annuelle de pluie dans la région parisienne au cours de la période 1951-1960 a été de 600 mm répartis sur 200 jours environ. La hauteur de pluie relevée en 24 heures y est supérieure, quinze jours par an, à 10 mm, et des précipitations supérieures à 40 mm par jour n'y surviennent qu'une fois tous les 3 à 5 ans. Il convient d'indiquer aussi que des hauteurs d'eau de 12 000 mm par an tombent en certains points du globe exceptionnellement favorisés.
L'intensité d'une précipitation, c'est-à-dire la hauteur de pluie tombée au cours d'un bref intervalle de temps, n'excède guère 5 mm par minute et de telles intensités ne sont généralement atteintes que pendant des durées très brèves. Les pluies les plus importantes relevées en 24 heures en France n'atteignent d'ailleurs que 600 mm en montagne (Mont Aigoual, 1963) et 435 mm en plaine (Perpignan, 1915).

L'évaporation

La mesure de l'évaporation par la surface du sol ou les surfaces d'eau libre est difficilement réalisable sur le terrain : aussi a-t-on cherché des moyens simples d'évaluer ces pertes d'eau.
Le plus simple et le plus répandu est *l'atmomètre*, ou *évaporomètre Piche*, dont le principe consiste à mesurer la perte en eau d'une surface poreuse mouillée placée sous abri. Il faut remarquer que cet instrument est soustrait à l'influence du rayonnement qui joue pourtant un rôle important dans la réalité. Néanmoins, des études menées à l'Institut National de la Recherche Agronomique ont montré qu'il était possible d'utiliser ces mesures pour le calcul de l'évapotranspiration par le sol et les végétaux, qui reste leur principale utilisation (hydrologie, irrigation).
On utilise aussi des *bacs d'évaporation* dont les caractéristiques et l'utilisation sont normalisées à l'échelle mondiale. Ils sont exposés à l'air libre, posés sur un socle de bois ; leur diamètre est de 1,20 m et la hauteur d'eau est de 20 cm environ. Ils simulent approximativement une nappe d'eau libre et le niveau de l'eau est périodiquement mesuré, corrigé des précipitations éventuelles, pour déterminer la hauteur évaporée. Dans ce cas, l'évaporation est soumise aux effets radiatifs et les résultats obtenus ne sont donc généralement pas directement comparables à ceux donnés par l'évaporomètre. Des procédés différents sont encore à l'étude, mais les solutions nouvelles qui pourraient être envisagées sont complexes et coûteuses.

La pression atmosphérique

La pression atmosphérique, dont la valeur moyenne au niveau de la mer est voisine de 1 015 mb, varie au maximum de ± 50 mb. Sa décroissance avec l'altitude est d'environ un millibar tous les 8 m de 0 à 500 m. Les observations de pression, principalement destinées au tracé des lignes d'égale pression atmosphérique au niveau de la mer, doivent être corrigées pour tenir compte de l'altitude des différentes stations.
L'instrument le plus utilisé est le *baromètre à mercure*, dont le principe consiste à opposer à la pression atmosphérique le poids d'une colonne de mercure dont on mesure la hauteur. Cette lecture doit être corrigée pour tenir compte de la pesanteur au lieu considéré, de la variation de la densité du mercure et de la longueur de l'échelle graduée avec la température, comme des imperfections de cette échelle. La précision de la mesure est de ± 0,2 mb et la fidélité de l'instrument est excellente.
Conjointement au baromètre à mercure, on utilise le *barographe à capsules* de Vidie, les variations de la pression et la forme de la courbe enregistrée ayant autant d'importance que la valeur de la pression elle-même. La capsule de Vidie est un boîtier étanche vide d'air, dont l'élasticité s'oppose à la pression atmosphérique ; une variation de pression se traduit donc par une variation d'épaisseur de la capsule, amplifiée par un système de leviers actionnant un style inscripteur. Le barographe possède une fidélité moindre que le baromètre à mercure, ce qui est dû en particulier à des phénomènes d'hytérésis (déformations résiduelles après une variation importante de la pression) et à la variation possible de la pression résiduelle dans la capsule. La précision est de l'ordre de ± 0,7 mb.
Il existe aussi des *baromètres anéroïdes indicateurs*, généralement comparables au barographe en ce qui concerne les performances, mais d'encombrement plus réduit et utilisables sur les navires, ce qui n'est pas le cas des types cités plus haut.
Des *baromètres anéroïdes*, de précision comparable à celle du baromètre à mercure sont



LA MESURE DU VENT EN ALTITUDE RESTE ESSENTIELLE POUR LA CONNAISSANCE DE L'ATMOSPHERE ET POUR LA PREVISION. ELLE PEUT ETRE OBTENUE PAR LACHER DE BALLONS DONT LA TRAJECTOIRE EST SUIVIE PAR DES EQUIPEMENTS RADAR PLUS OU MOINS PERFECTIONNES. ICI, LE BALLON EST MUNI D'UN SIMPLE REFLECTEUR DES ONDES RADIOELECTRIQUES.

construits depuis quelques années. Leur prix est nettement plus élevé à cause de la technique employée pour détecter les variations d'épaisseur de la capsule (palpeur micrométrique et indication numérique) et de la qualité de la capsule elle-même, soigneusement vieillie pour en stabiliser les caractéristiques. La fidélité de ces appareils n'est cependant pas encore comparable à celle des baromètres à mercure et des étalonnages périodiques sont nécessaires.

Les baromètres anéroïdes de fabrication courante, de même que les baromètres à mercure de type ancien, portent sur leur cadran, d'une part des graduations en mm de mercure, d'autre part, dans l'ordre des pressions croissantes, des indications telles que : « Tempête », « Pluie », « Variable », « Beau temps ». Ces indications qualitatives se réfèrent à la pression « réduite au niveau de la mer ». C'est la pression mesurée en un lieu, augmentée de celle qu'exercerait une colonne d'air fictive qui aurait pour hauteur l'altitude du lieu. Le calcul de cette pression doit tenir compte, entre autres, de la température de cette colonne d'air, mais on peut adopter une loi de variation approchée de la pression avec l'altitude, telle que celle qui sert de base à la graduation des altimètres (atmosphère standard). Selon cette loi, si la pression au niveau de la mer est de 1 013 mb, la pression à 100 m est de 1 001 mb, à 200 m de 989 mb, à 500 m de 955 mb et à 1 000 de 899 mb. Il en résulte qu'un baromètre placé à 500 mètres devrait être réglé de telle façon qu'il indique une pression supérieure de 58 mb à la pression réelle : on évite ainsi que le baromètre utilisé à 500 m n'indique systématiquement « Pluie » ou « Tempête » durant toute l'année.

Vitesse et direction du vent

Le vent est mesuré à une hauteur normalisée : 10 mètres au-dessus du sol. Les capteurs sont nécessairement fixés au sommet d'un pylône, qui perturbe le moins possible l'écoulement de l'air. Le fait de les installer au faîte d'un toit, par exemple, pourrait entraîner des erreurs de l'ordre de 50 % sur la vitesse et de plusieurs dizaines de degrés sur la direction. La vitesse du vent est habituellement exprimée en mètres par seconde, et sa direction en degrés comptés dans le sens rétrograde à partir du Nord géographique. Il faut préciser qu'il s'agit conventionnellement de la direction d'où vient le vent.

La vitesse du vent est extrêmement variable et la périodicité moyenne des fluctuations à courte période est de l'ordre de la minute, d'où la nécessité d'épurer la mesure de ses

Un anémomètre à main. Le moulinet fixé à l'extrémité de l'axe vertical de l'appareil est constitué d'un jeu de coupelles hémisphériques. Sa vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse du vent.

variations aléatoires en prenant la moyenne des valeurs successives sur une période de plusieurs minutes.

Les vitesses maximales mesurées en France dans les stations de faible altitude excèdent rarement 25 m/s, soit 90 km/h. Il est exceptionnel d'atteindre 40 m/s, même en montagne, et, dans les plus forts cyclones tropicaux, les vitesses maximales sont de l'ordre de 65 m/s (234 km/h).

La vitesse est mesurée à l'aide d'un *anémomètre à moulinet* monté sur un axe vertical. Le moulinet est constitué, suivant le type d'appareil, de 3 ou 4 coupelles hémisphériques à l'extrémité de bras fixés à l'axe. La vitesse de rotation du moulinet, pratiquement proportionnelle à la vitesse du vent, est convertie soit en tension électrique (à l'aide d'un alternateur), soit en impulsions électriques. Dans le premier cas, le courant alternatif est redressé puis appliqué à un ou plusieurs galvanomètres enregistreurs ou indicateurs. Dans le second cas, les signaux sont amplifiés, mis en forme, puis intégrés, et le courant continu proportionnel résultant est appliqué à des galvanomètres indicateurs ou enregistreurs, qui peuvent évidemment être situés à plusieurs kilomètres des capteurs. Le second procédé de mesure est plus souple car, la réponse électrique étant linéaire en fonction de la vitesse du vent, une grandeur électrique équivalente à la vitesse moyenne peut être élaborée en permanence par un simple circuit d'intégration de grande constante de temps. La précision de la mesure est de l'ordre de ± 3 %.

La direction du vent est repérée à l'aide de la *girouette à résistance*. L'élément mobile de la girouette est une palette profilée à plan de

La visibilité peut être évaluée par un observateur disposant de repères dont la distance est connue, mais des appareils peuvent fournir des données intéressantes. Ainsi, le transmissomètre, surtout utilisé près des aéroports, mesure l'absorption d'un faisceau lumineux par l'atmosphère.

symétrie vertical fixée à un bras horizontal et équilibrée par un contrepoids. L'ensemble est fixé à un axe vertical monté sur roulements à billes. L'axe entraîne un curseur qui peut venir en contact avec 18 plots successifs constituant un rhéostat qui fait varier le courant passant dans un ou plusieurs galvanomètres enregistreurs ou indicateurs. La direction est indiquée par secteurs de 20° chiffrés en dizaines de degrés paires, les résistances du rhéostat étant calculées de telle sorte que la déviation du galvanomètre soit proportionnelle à l'angle indiqué. L'information peut, comme pour la vitesse du vent, être transmise à plusieurs kilomètres de distance.

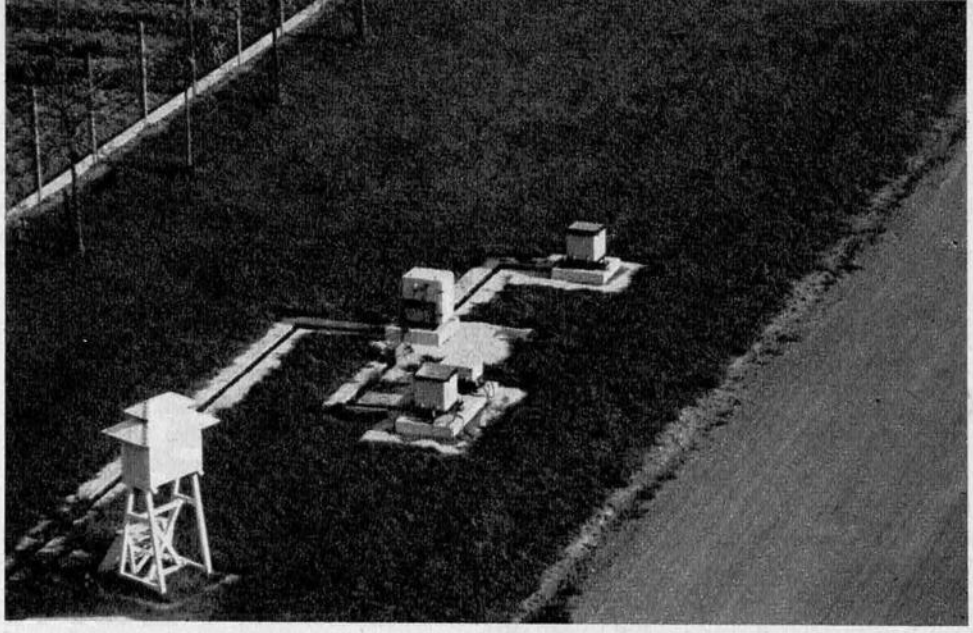
Les rayonnements

La composante du rayonnement solaire la plus couramment mesurée est le rayonnement global, c'est-à-dire le rayonnement reçu sur une surface horizontale en provenance du Soleil et de la totalité de l'hémisphère céleste. Il s'agit donc du *rayonnement de courte longueur d'onde* (0,3 à 5 µm), à l'exclusion du rayonnement propre de l'atmosphère et du sol, dit *rayonnement de grande longueur d'onde*, émis entre 5 et 100 µm.

Le rayonnement global varie considérablement dans le temps et dans l'espace, sous l'influence de facteurs astronomiques (heure, déclinaison du Soleil, distance Terre-Soleil) et de facteurs atmosphériques (teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, aérosols en suspension dans l'air, nuages). Les valeurs extrêmes de l'énergie solaire globale reçue en une journée en France varient de 30 joules par cm² en hiver par ciel couvert à 3 000 joules par cm² par une journée d'été ensoleillée. La moyenne annuelle est de 1 000 joules par cm² dans le Nord de la France et de 1 600 joules par cm² dans les régions méditerranéennes.

Les instruments destinés à ces mesures sont des *pyranomètres* à pile thermoélectrique qui effectuent, grâce à des thermocouples convenablement disposés, la mesure du flux thermique provenant d'une surface noire absorbant le rayonnement. L'éclairement énergétique de la surface sensible est donc converti en une grandeur électrique proportionnelle, enregistrée à l'aide d'un galvanomètre puis intégrée, graphiquement ou automatiquement. L'intégration dans le temps est nécessaire pour passer de la *puissance* par unité de surface à l'*énergie* par unité de surface, qui est la seule grandeur pratiquement utilisée. La précision de ces instruments est de l'ordre de 5 %, à condition que des réétalonnages fréquents soient effectués et que de nombreuses précautions soient prises en cours d'utilisation. Des appareils spéciaux sont évidemment nécessaires pour étalonner les pyranomètres.

Le rayonnement propre du sol et celui de l'atmosphère jouent un rôle important dans le bilan énergétique au niveau du sol. Telle est la cause bien connue des refroidissements nocturnes observés par ciel clair et des gelées de printemps. La mesure de ces échanges est donc d'un intérêt évident, et la mesure au niveau du sol de la différence entre la totalité du rayonnement dirigé vers le bas et la totalité du rayonnement dirigé vers le haut représenterait le bilan radiatif à ce niveau. Des instruments appelés *pyradiomètres différentiels* (ou *bilanmètres*) ont été construits dans ce but. Toutefois, s'agissant de mesurer une énergie rayonnante dans un intervalle spectral très large (0,3 à 100 µm), des difficultés technologiques importantes sont encore à surmonter avant qu'un instrument réellement



Une installation de télémétrie de nuages mesure, au voisinage des pistes des grands aéroports, le temps de transit d'une impulsion lumineuse entre le sol et la base des nuages. Ce procédé donne des résultats plus précis que l'utilisation de ballons, en raison, en particulier, des turbulences.

utilisable et de précision acceptable soit commercialisé. Des mesures sporadiques sont effectuées, à l'étranger et en France, mais elles demeurent sujettes à caution.

La visibilité

La visibilité est définie comme la plus grande distance à laquelle un objet ayant des caractéristiques définies peut être vu et identifié. Cette grandeur dépend en partie de l'œil de l'observateur et est donc essentiellement subjective. Une nouvelle grandeur a été adoptée en 1957 par l'Organisation Météorologique Mondiale, la « portée optique météorologique », définie comme *la longueur du trajet que doit effectuer dans l'atmosphère un faisceau lumineux à rayons parallèles, émanant d'une lampe à incandescence à une température de couleur de 2 700 °K, pour que l'intensité du flux lumineux soit réduite à 0,05 fois sa valeur initiale, ce flux étant évalué au moyen de la fonction de luminosité photopique de la Commission Internationale de l'Eclairage.* Les deux définitions sont pratiquement équivalentes.

Dans la majorité des cas, la visibilité est évaluée par l'observateur au moyen de repères de distance connue, mais quelques instruments ont été conçus pour donner en permanence une valeur de la visibilité calculée à partir du pouvoir transmissif de l'atmosphère.

Deux méthodes sont principalement utilisées :

— la méthode directe fait appel à la mesure de l'absorption d'un faisceau lumineux sur un trajet déterminé, c'est-à-dire du pouvoir transmissif de l'atmosphère ou de sa transmittance optique.

— la méthode indirecte consiste à mesurer la lumière diffusée dans un angle solide défini par rapport à l'axe d'un faisceau de caractéristiques connues. Le pouvoir transmissif de l'atmosphère peut se déduire indirectement de cette mesure, par des étalonnages préalables.

La hauteur des nuages

La hauteur des nuages doit être connue avec précision dans la mesure où cette hauteur est faible et susceptible en particulier de constituer une entrave à la circulation aérienne. Les moyens de mesure utilisés en France ne sont applicables qu'aux hauteurs inférieures à 3 000 m.

Le procédé le plus simple consiste à mesurer la hauteur angulaire au-dessus de l'horizon de la tache lumineuse produite de nuit sur la base du nuage par un projecteur à axe vertical. En modulant la lumière émise et en détectant la tache lumineuse à l'aide d'une cellule photoélectrique, ce principe est applicable aux mesures diurnes.

De jour, on peut aussi mesurer le temps mis par un ballon de vitesse ascensionnelle connue pour disparaître dans le nuage. Ce procédé peut conduire à des erreurs importantes en cas de turbulence de l'atmosphère ou de précipitations alourdissant le ballon.

Un procédé beaucoup plus précis, *le radar à impulsions lumineuses* ou télémètre de nuages, est utilisé sur les aérodromes importants. Son principe consiste à mesurer le temps mis par une impulsion lumineuse pour retourner au sol après diffusion par les nuages. La précision de cette mesure est de ± 10 m et la portée de l'instrument est de 1 500 m.

Il convient de noter que, dans la plupart des cas, la base d'un nuage n'est pas horizontale et que deux mesures effectuées à quelques minutes d'intervalle peuvent différer de plusieurs centaines de mètres.

Guy LAMBOLEY

Les stations automatiques

A son origine, l'automatisation des mesures météorologiques a été essentiellement dictée par le souci d'obtenir des informations de régions difficilement accessibles. Les radiosondes qui fournissent les données sur la structure verticale de l'atmosphère constituent un bon exemple d'équipements mis au point pour répondre à un tel souci.

C'est avec l'apparition des stations automatiques que l'on peut réellement parler d'automatisation de l'observation météorologique.

En France, dès la fin de la seconde guerre mondiale, sous l'impulsion de l'ingénieur général Perlat, la Météorologie Nationale avait étudié un prototype, qui, après quelques essais en métropole, conduisit à la fabrication d'un équipement installé à Laghouat en juillet 1952. En fonction des ordres donnés par un dispositif chronométrique spécialement programmé, ce matériel transmettait régulièrement par radio les valeurs de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité de l'air, de la vitesse et de la direction du vent, de la quantité de pluie tombée depuis l'observation précédente. Sans être parfaits, les résultats furent jugés suffisamment encourageants pour que la réalisation d'une série d'appareils soit décidée. Une quarantaine d'exemplaires furent construits et installés principalement dans des zones désertiques (Sahara) et des îles où ils pouvaient être abandonnés pendant parfois plus de 6 mois. Quelques installations furent même effectuées sur le continent antarctique par les météorologistes australiens.

Grâce à cette première génération d'équipements, la France est semble-t-il, le premier pays ayant réellement fait sortir les stations automatiques du stade expérimental. Les résultats, pourtant, furent au début loin d'atteindre la perfection. Lentement ils s'améliorèrent et un assez grand nombre de ces premiers matériels fonctionnent encore actuellement. La réception des informations ne pouvait être assurée que par un opérateur radio spécialisé, la liaison s'effectuant en Morse ; pour des raisons de commodité des codages, les valeurs mesurées étaient transmises en lettres et non en chiffres, et ceci imposait à l'utilisateur une opération de conversion qui, dans les équipements modernes, a été éliminée.

Il est vrai que l'objectif à atteindre a sensiblement évolué. L'emploi de ces matériels n'est plus limité aux seules terres déshéritées. Ils interviennent en auxiliaire direct de l'observateur humain. Pour que celui-ci soit rendu totalement disponible pour d'autres tâches, tout doit être mis en œuvre pour qu'entre l'élément qui assure la mesure (ce que les spécialistes appellent le « capteur ») et l'organe d'utilisation des données, l'intervention de l'homme soit pratiquement nulle.

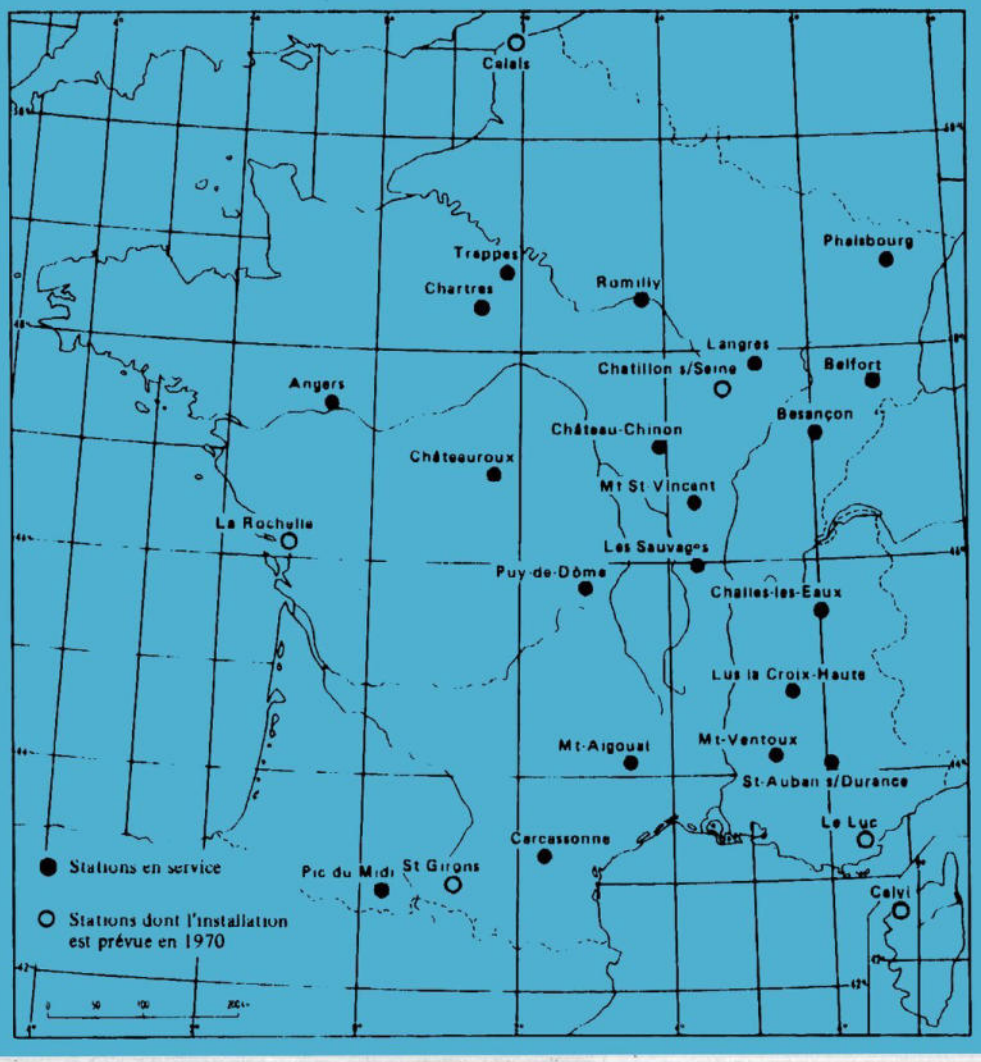
Une station automatique moderne devrait même produire des informations pouvant être directement injectées dans un calculateur de prévision. Les ensembles S.A.T.I.N. (Station Automatique Transmettant des Informations Numériques), mis au point par la Météorologie Nationale et par la Compagnie des Compteurs, satisfont assez bien cette exigence. Ils assurent la mesure automatique des paramètres météorologiques les plus classiques et les présentent sous la forme d'un message tout à fait identique à celui que pourrait rédiger un observateur humain. Chaque donnée apparaît sous forme numérique et dans l'unité qui lui est propre, ce qui permet l'exploitation directe sans qu'il soit nécessaire de la faire précéder d'une quelconque interprétation.

Ces équipements, dont une vingtaine est déjà installée en France, sont le plus fréquemment employés dans des stations trop petites pour qu'on puisse y maintenir un effectif suffisant. Grâce à eux, la permanence de l'observation est assurée de nuit comme de jour, les messages étant automatiquement acheminés par télétypes vers des centres régionaux pour être rediffusés ensuite à l'échelle nationale.

Les ensembles S.A.T.I.N. peuvent également être utilisés comme stations climatologiques automatiques. Ils enregistrent alors sur bande perforée toutes les observations effectuées. L'exploitation, par un ordinateur, de la bande ainsi produite fournit, pour des périodes variant entre 1 et 6 mois suivant la fréquence adoptée, les caractéristiques climatologiques du lieu d'implantation de l'appareil. Ainsi est effectuée, par exemple, l'étude climatologique du site du futur aéroport de Roissy-en-France, où un prototype a été installé en 1966.

A l'étranger, si on exclut les Etats-Unis et l'U.R.S.S., les travaux effectués sur les stations automatique n'ont pris de l'importance que depuis quelques années. L'Organisation Météorologique Mondiale insiste pour qu'un effort tout particulier soit fait dans ce domaine afin de satisfaire les exigences de ce qu'elle appelle la Veille Météorologique Mondiale (V.M.M.). Elle a organisé, en 1967, une conférence internationale qui a réuni, sous la présidence d'un Français, plus de 100 spécialistes représentant 32 pays. Ceux-ci ont essayé de définir une politique destinée à combler les vides dans les réseaux d'observation météorologique que constituent les océans et les zones déshéritées. Des projets ambitieux ont été avancés. Les Américains ont, en particulier, proposé la mise

LE RÉSEAU DE STATIONS SYNOPTIQUES AUTOMATIQUES EN FRANCE.



en place de bouées et stations automatiques dont les informations seraient périodiquement collectées par des satellites et diffusées au passage au-dessus des continents. Ce ne sont malheureusement là que des projets dont la réalisation se heurte aux difficultés rencontrées dans la mise au point d'équipements « bon marché », capables de fonctionner dans des conditions difficiles sur une longue période.

Dans ce domaine de l'automatisation de l'observation, les travaux ne se sont pas limités aux seules stations automatiques. Un très gros effort est également fait pour automatiser l'exécution de certaines mesures dans les stations conventionnelles et, tout particulièrement, dans celles installées sur les grands aéroports. Pour ces derniers, en effet, le rôle de l'observateur devient de plus en plus écrasant, les renseignements, de plus en plus complexes et nombreux, devant être transmis à fréquence toujours plus grande. Toute erreur peut avoir, pour l'avion qui se pose ou qui décolle, des conséquences fort graves. Il est donc essentiel que la tâche de l'observateur soit facilitée. Les travaux effectués jusqu'ici tendent à créer de véritables centrales de données présentant sous forme numérique, en un seul tableau, tous les paramètres météorologiques utiles.

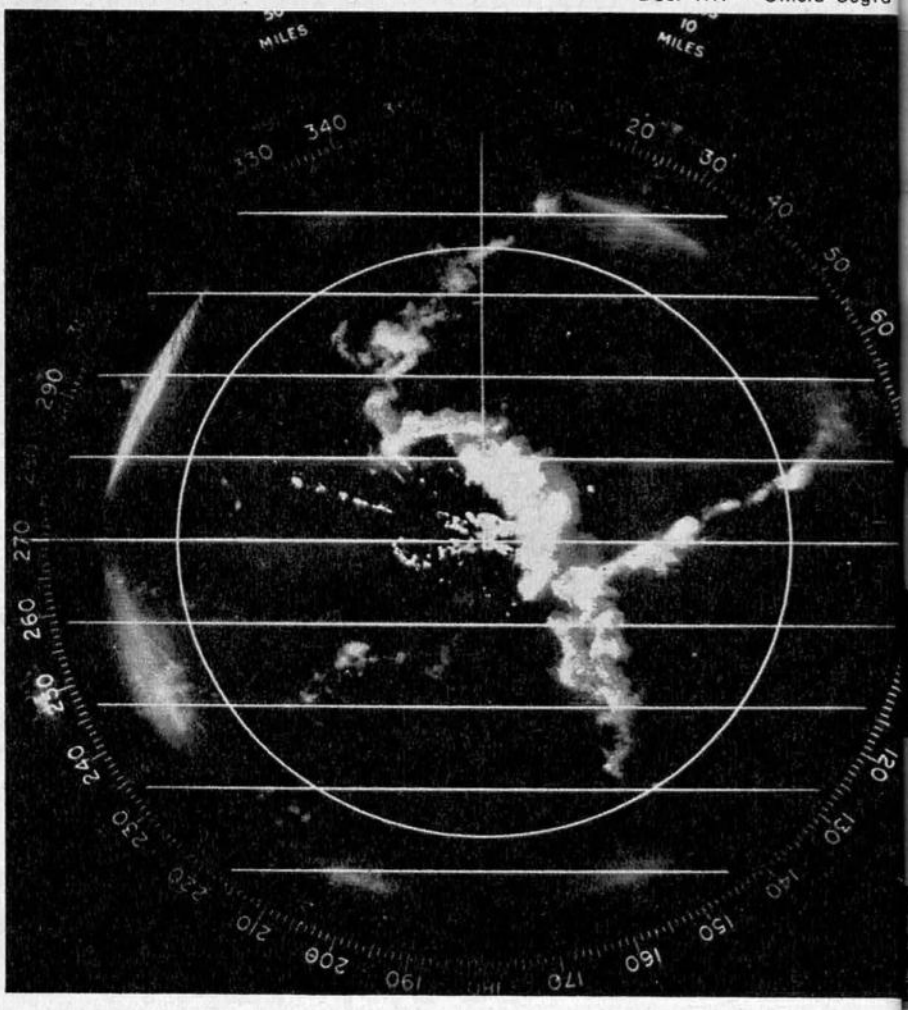
Au cours des quatre dernières années, avec le concours de l'industrie privée, deux types d'appareils ont été mis au point. Ceux-ci, les CAVIAR (Calculateur Automatique de la VIsibilité AéRonautique) et, plus récemment, les LYNX, assurent d'une manière continue le calcul automatique et la présentation de la portée visuelle des pistes, c'est-à-dire de la visibilité que rencontrera le pilote au moment de l'atterrissage. Comme ce paramètre essentiel dépend non seulement des conditions atmosphériques mais aussi de l'intensité des balises de piste et de la luminance générale sur l'aéroport, on comprend aisément tout l'intérêt que peuvent présenter de telles réalisations.

Ce n'est pourtant là qu'une étape. D'autres travaux doivent être entrepris pour conduire à une automatisation plus poussée encore. Certains spécialistes prévoient que, dans un proche avenir, les pilotes recevront directement les informations météorologiques dont ils ont besoin pour l'atterrissage de complexes automatiques d'observation transmettant en radiophonie. Ce n'est pas là de la science-fiction. Pour s'en persuader, il suffit de rappeler qu'une station automatique parlante a fonctionné en France il y a déjà une dizaine d'années.

Henri TREUSSART

Les radars météo

Doc. TRT - Omera Segid



En page de droite, l'aérien d'un radar météorologique pour la localisation et la mesure des précipitations. La longueur d'onde de fonctionnement est de 10 cm. Ci-contre, l'image d'une zone de précipitations obtenue sur l'écran d'un tel radar.

Le 19 août 1969, la presse et la radio du monde entier faisaient part des terribles ravages causés aux Etats-Unis par l'ouragan « Camille ». Quelques jours plus tard, le bilan s'établissait à plus de 200 morts, à des milliers de blessés et à des dégâts estimés, pour les seules installations militaires de la côte sinistrée, à plus de 500 millions de dollars.

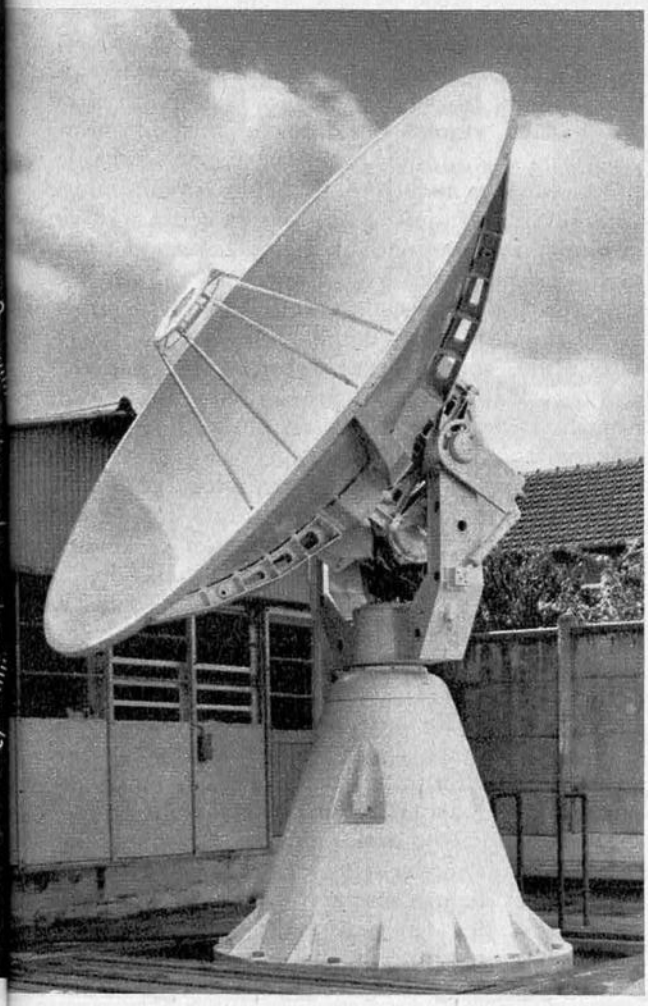
Aussi lourd que soit ce bilan, il aurait été indéniablement plus élevé si, tout au long de la période critique, la population n'avait été informée du déplacement et de l'intensité du phénomène. Au tout premier plan de ce système d'alerte, il convient de mentionner les radars météorologiques.

Les radars ne sont pas, à proprement parler, une nouveauté dans le domaine de l'instrumentation météorologique. Dès le lendemain de la 2e guerre mondiale, les météorologistes ont compris tout l'avantage qui'ils pourraient tirer de ce qui, pour les opérateurs-radar était une gêne : les échos de précipitations. Dès 1942-1944, les marins, tout particulièrement dans le Pacifique, avaient observé sur l'écran de leur radar des échos météorologiques intenses. Parfois même ils les confondirent avec ceux d'une flotte ennemie. Il est vrai que la méprise était souvent facile, les échos fournis par une simple ligne de grains étant aisément assimilables à ceux provoqués par une escadre en formation de combat.

L'existence des échos de précipitations est due à la propriété qu'ont les gouttes d'eau et, d'une manière plus générale, les particules en suspension dans l'atmosphère, de diffuser les ondes radioélectriques émises par les radars. Recueillant une partie de l'énergie qu'il a émise, le radar fournit sur son écran une présentation de la position et de la forme des zones de précipitations.

Au tout début de l'exploitation météorologique des radars, les spécialistes se contentèrent de ce seul type d'information, la connaissance des zones où il pleut constituant déjà un progrès remarquable. Assez rapidement cependant, ils découvrirent qu'ils étaient loin d'avoir épuisé toutes les possibilités de l'outil mis à leur disposition.

Dès 1947, tant aux Etats-Unis qu'au Canada, les travaux s'orientèrent vers l'exploitation de



l'intensité des échos reçus. Marshall et son équipe de la Mac Gill University de Montreal montrèrent que l'amplitude des signaux radars pouvait être reliée à l'intensité de la pluie. Si on analyse le phénomène de rétro-diffusion précédemment mentionné, on constate que l'énergie renvoyée au radar par une particule varie, dans le cas le plus simple, celui des gouttes d'eau, en fonction de leur nombre et de leur diamètre. On peut donc, à priori, penser que les signaux radar dépendent de la quantité d'eau fournie par les précipitations. En fait, le problème est moins simple, car les « caractéristiques radar » des gouttes d'eau varient non pas en fonction de leur volume, mais du carré de celui-ci. Ainsi, l'énergie renvoyée par une particule est multipliée par 64 quand son diamètre passe du simple au double.

Le problème est également compliqué par le fait que la quantité d'eau recueillie au sol, celle qui intéresse vraiment le météorologiste, dépend non seulement du volume des gouttes, mais aussi de leur vitesse de chute. Il n'est donc plus possible de relier l'intensité des échos et celle des précipitations par une relation unique. Entre ces deux paramètres on ne peut mettre en évidence que des liaisons à caractère statistique qui sont encore, dans le monde entier, l'objet de très importantes études.

Pour établir une véritable corrélation entre le signal radar et l'intensité des précipitations, il est également indispensable que l'information soit réellement représentative du phénomène météorologique. En d'autres termes, il faut que le signal produit en un point d'une zone de précipitations ne soit pas influencé par des phénomènes autres que la précipitation elle-même en ce point. Ceci pose le problème de l'absorption à laquelle sont soumises les ondes radar.

Il existe, pour les ondes radar, trois types d'absorption : l'absorption moléculaire, principalement par la vapeur d'eau et l'oxygène ; l'absorption due aux nuages ; celle, enfin, due à la pluie. Cette dernière est, de loin, pratiquement, le plus importante. Pour une précipitation d'une intensité donnée, elle est d'autant plus forte que la longueur d'onde utilisée est plus courte. Avec une longueur d'onde de 3 cm, jusqu'ici la plus utilisée par les météorologistes, elle n'est négligeable que pour les pluies dont l'intensité ne dépasse pas quelques millimètres par heure. C'est pourquoi la tendance actuelle est au remplacement des radars fonctionnant sur 3 cm par des équipements utilisant la longueur d'onde de 10 cm, laquelle n'est réellement atténuée que par des précipitations dépassant l'intensité, tout à fait exceptionnelle pour nos régions, de 100 millimètres par heure. S'alignant sur cette tendance, une firme française (OMERA) a réalisé un équipement radar très moderne désigné sous le nom de MELODI (MEsures LOcalisation DIx centimètres), destiné à servir de base aux prochaines installations de la Météorologie Nationale.

Bien que son emploi tende à se généraliser, la longueur d'onde 10 cm ne présente pas que des qualités. Elle est en particulier moins bien diffusée par les gouttes d'eau que les ondes plus courtes, ce qui impose l'emploi d'équipements très puissants et donc coûteux. Pour fixer les idées, signalons que la puissance émise ne dépasse pas 20 kW dans les ensembles 3 cm, alors qu'elle atteint dans le radar MELODI la valeur de 800 kW.

Les radars 10 cm sont également pénalisés par les dimensions importantes de leurs antennes. Pour être efficace, un radar météorologique doit en effet avoir un faisceau d'émission étroit, car il ne faut pas qu'il intercepte, à des distances de l'ordre de 100 km, un volume de précipitations trop grand. Malheureusement, la largeur du faisceau croît avec la longueur

Le pupitre du radar MELODI. En face de l'opérateur, l'écran de visualisation. A droite, l'écran secondaire pour le contrôle d'amplitude des échos. Les cadrans, à gauche, servent au pointage de l'aérien du radar.

d'onde et, pour maintenir inchangées les possibilités d'analyse fine de l'équipement, toute augmentation de la longueur d'onde doit s'accompagner d'une accroissement des dimensions de son antenne.

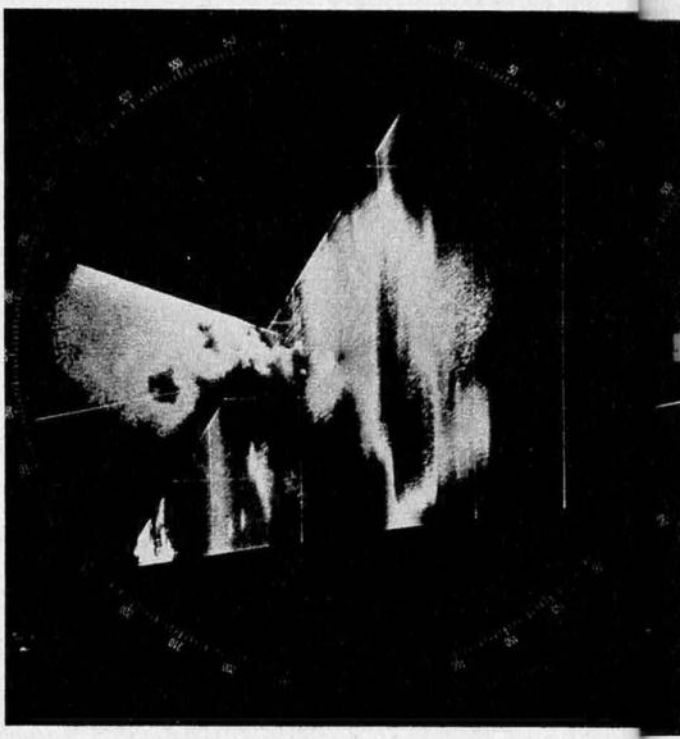
Tout ceci entraîne pour les radars météorologiques modernes des équipements d'un prix élevé, surtout si on tient compte de l'exploitation, qui impose fréquemment l'adjonction d'ensembles de traitement de l'information. Parmi ceux-ci, nous devons mentionner les dispositifs qui déterminent d'une manière précise l'intensité des échos reçus. Or, le radar conventionnel est mal adapté à cette tâche : l'exploitation directe des variations de luminance sur son écran ne fournit que des indications limitées sur l'amplitude des signaux (par suite de ce que les spécialistes appellent « l'insuffisance de dynamique » des tubes cathodiques). Disons que, par suite de phénomènes de saturation, tous les échos, dès qu'ils dépassent une certaine intensité, apparaissent sur l'écran avec une luminance identique. Il n'est plus possible alors de distinguer les pluies intenses des pluies modérées.

Pour surmonter cette difficulté, les radars météorologiques sont munis de divers dispositifs, soit directement incorporés à l'équipement, soit, dans des versions plus élaborées, extérieurs à celui-ci. Parmi les premiers, citons les circuits isoéchos et isocontours. Avec l'isoécho, le météorologiste peut ne laisser subsister sur l'écran que les signaux dont l'amplitude dépasse une certaine valeur. Ce système, précieux pour certaines utilisations mentionnées plus loin, a, par contre, le désavantage de ne pas laisser subsister les échos les plus faibles.

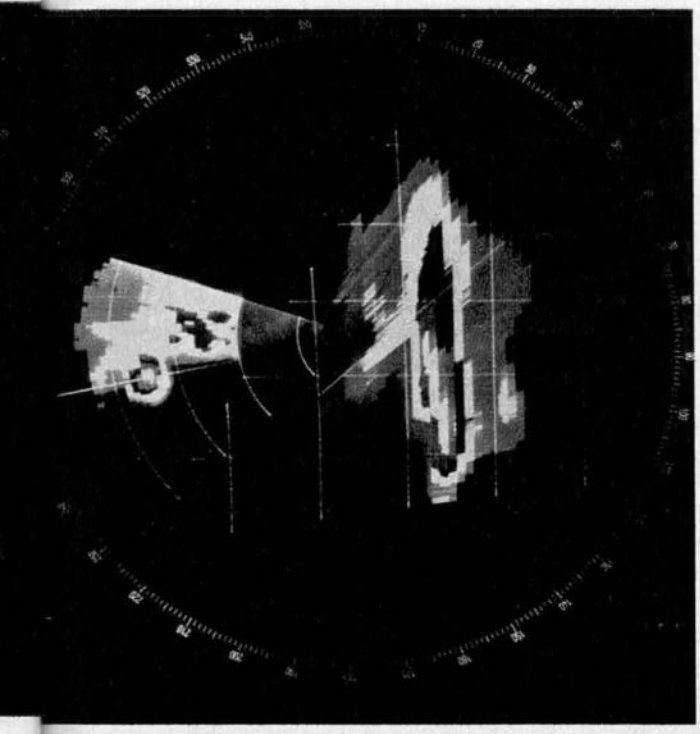
L'isocontour, mis au point par l'Américain Atlas, n'a pas cet inconvénient. Il permet de distinguer simultanément sur l'écran les échos les moins intenses de ceux dépassant un certain niveau. Pour cela, il assure une inversion des signaux forts, ce qui, sur l'écran du tube cathodique, donne des images plus ou moins en forme d'auréoles dont la partie centrale, noire, représente les zones où les phénomènes sont les plus intenses. Simple et séduisant, ce système n'est cependant pas à l'abri de toute critique. Dans le cas d'une précipitation à structure complexe, les zones d'activité forte se distinguent difficilement des zones d'activité nulle, toutes étant représentées par des « noirs ». Malgré cet inconvénient, l'isocontour est très largement utilisé, en particulier à bord des avions commerciaux.

Parmi les dispositifs plus élaborés, généralement installés en « périphérique » du radar, l'ensemble V.I.P. (Video Integrator Processor) des Américains est le plus moderne. Conçu par Lhermitte, il permet non seulement la visualisation immédiate des échos répartis en six classes d'intensité, mais il apporte aussi, pour la première fois, une solution au délicat problème du filtrage des signaux fournis par les précipitations.

Une précipitation, c'est essentiellement un ensemble de particules qui, à un instant donné, sont distribuées d'une manière aléatoire. Par suite de leur mouvement permanent, elles fournissent des échos radar dont l'amplitude est soumise à des fluctuations, également aléatoires, qui du point de vue du météorologiste ne sont pas significatives. Il est donc indispensable de travailler sur des échos filtrés,



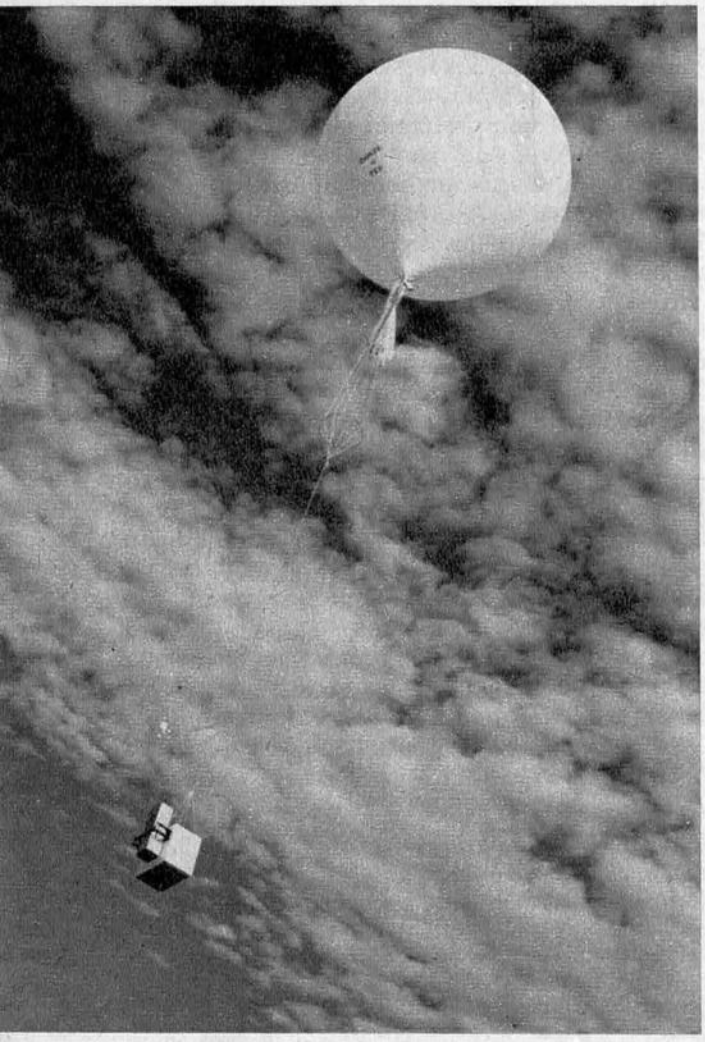
débarrassés des fluctuations les plus rapides. Cette opération est réalisée d'une manière tout à fait satisfaisante par le V.I.P.
Au deuxième stade de l'exploitation de l'information radar, il est nécessaire d'effectuer sur une longue période l'intégration des signaux fournis par un dispositif du genre V.I.P. C'est sur ce point que les travaux les plus importants restent à faire. Les équipements nécessaires sont complexes, donc coûteux ; de ce fait, les réalisations sont restées, jusqu'ici, expérimentales. Elles n'ont généralement pas dépassé, comme dans le cas du STRADAP américain, le stade de la présentation numérique d'une image radar. Ce n'est malheureusement là qu'une étape : pour passer à la suivante, un important équipement de calcul est nécessaire.
Même si ce problème reste encore quelques années sans solution pratique, le radar conservera un rôle de tout premier ordre, avec des applications immédiates extrêmement importantes. L'aéronautique, pour sa part, peut dès maintenant tirer du radar météorologique un exceptionnel élément de sécurité. Celui-ci permet, en effet, de déterminer et de localiser tout ce que nous engloberons sous l'appellation générale de « phénomènes dangereux » : grêle, orages, turbulences liées aux zones de précipitations.
Sans entrer dans le détail de cette exploitation particulière, disons que, du point de vue opérationnel, il est possible de diviser les échos fournis par un radar météorologique en échos dangereux, échos non dangereux et échos dans lesquels un danger peut être rencontré, sans que le risque encouru puisse être explicité d'une manière précise. On imagine aisément l'intérêt que peut avoir l'exploitation de telles informations pour la sécurité ou, simplement, le confort des passagers des lignes aériennes. Pour des raisons extérieures au problème technique lui-même, cette exploitation reste, sauf en Australie, à un niveau très inférieur à ses possibilités actuelles.
Nous avons cité la grêle parmi les phénomènes dangereux pour l'aéronautique. Son importance n'est pas limitée à ce domaine : pour s'en convaincre, il suffit d'évoquer les sommes dépensées par l'agriculture pour essayer de s'en protéger. Là encore, le radar météorologique est extrêmement précieux. Les Soviétiques l'ont particulièrement bien compris ; dans leur pays, des stations de lutte contre la grêle sont équipées de radars qui permettent non seulement d'identifier les nuages grêligènes, mais aussi de définir les actions à entreprendre. Des équipes d'une qualification exceptionnelle ont été mises en place à ce propos. En Arménie et en Georgie, par exemple, le Professeur Soulakvelidze dirige plusieurs centaines de personnes dont la seule tâche est la protection des cultures contre la grêle. Avec de jeunes radaristes comme Abchaief, il a mis au point une théorie originale proposant des règles d'identification de la grêle à partir des signaux fournis par deux radars fonctionnant sur des longueurs d'onde différentes. Ces méthodes extrêmement détaillées prévoient même la détermination du diamètre des grêlons avant qu'ils n'atteignent le sol. Leur généralisation, par contre, pose des problèmes financiers en raison de la pénalisation introduite par l'emploi d'un double équipement.
Il est donc à prévoir que, pendant de nombreuses années encore, l'observation de la grêle s'effectuera en de nombreux pays au moyen d'équipements fonctionnant sur une seule longueur d'onde. Les possibilités de ceux-ci ne doivent d'ailleurs pas être sous-estimées ; le météorologiste disposant d'un radar moderne peut, à partir de l'amplitude des échos et de sa variation dans le plan ver-



A gauche, image obtenue sur l'écran d'un radar avec dispositif isocontour. La partie droite correspond à l'analyse de la précipitation dans le plan vertical, la partie gauche, à l'analyse dans le plan horizontal. Le signal revêt deux niveaux d'intensité : zones blanches et zones noires centrales (signal plus intense). A droite, même analyse avec dispositif VIP. La succession des teintes permet de distinguer jusqu'à six valeurs de l'intensité.

tical, identifier les zones grêligènes avec une probabilité tout à fait acceptable.
Pour être complets, nous devons également mentionner les possibilités offertes par le radar météorologique à la recherche pure. En permettant l'examen continu des phénomènes tant dans le plan horizontal que vertical, il contribue à mieux nous faire connaître la physique des nuages et les processus de formation des précipitations. Dans ce domaine, des perspectives nouvelles se dessinent, en particulier depuis l'apparition des radars Doppler. Grâce à eux, le météorologiste peut déterminer les mouvements des particules fournissant les échos et en déduire la structure fine du vent dans un rayon de quelques kilomètres autour du radar. De nombreux travaux sont actuellement effectués dans plusieurs pays sur ce sujet, mais il est encore trop tôt pour savoir si les résultats acquis feront des radars Doppler de simples outils de recherche ou des équipements normaux de l'arsenal du météorologiste de demain.
Pour terminer ce tableau général, il nous faut citer les radars fonctionnant sur de plus courtes longueurs d'onde, 8 mm par exemple, en vue de la détection des gouttelettes et de la localisation des couches de nuages à la verticale d'un point. Il faut également mentionner les « radars » à longueurs d'onde lumineuses, (lidars). Grâce à l'intensité des lasers qu'ils utilisent, ils s'attaquent aux particules de très faibles dimensions, aux aérosols atmosphériques. Ils ouvrent de nouvelles voies à la recherche en matière de diffusion et de pollution, domaines dans lesquels ils doivent être signalés tant pour les expérimentations originales qu'ils permettent que pour des applications variées qui commencent à apparaître.

Henri TREUSSART



Pour la mesure de la température, de la pression, de l'humidité en altitude, la méthode la plus simple est l'envoi de radiosondes entraînées par ballon.

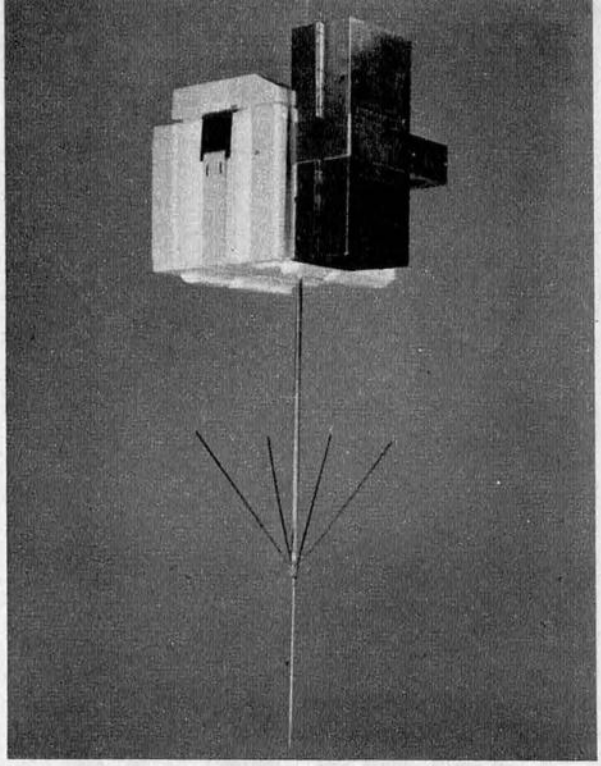
Mesures aérologiques

Il s'agit ici des mesures effectuées au sein même de l'atmosphère. Les plus couramment demandées pour la météorologie concernent la pression, la température, l'humidité, le vent (direction et vitesse), l'ionisation ou le champ électrique, la répartition verticale de l'ozone, les échanges radiatifs à divers niveaux, le contenu de l'atmosphère en aérosols, en noyaux de condensation ou en particules radioactives.
On peut parfois mesurer indirectement ces paramètres à partir d'instruments situés au sol, ou au contraire à très grande altitude : ainsi la mesure de la température en altitude peut s'effectuer soit à partir du sol, soit à partir d'un satellite, en utilisant des appareils de radiométrie travaillant dans le domaine du rayonnement terrestre (3 à 50 μm). Mais ces systèmes nécessitent un élément complémentaire pour situer le niveau de mesure : il s'agit généralement d'utiliser une cible naturelle émettant elle-même les rayonnements mesurés, par exemple la base d'un nuage dont on connaît l'altitude, ou l'oxygène de l'air dont on connaît la répartition verticale et l'émissivité.
En général, ces méthodes indirectes sont complexes et nécessitent l'utilisation d'un matériel coûteux et délicat. Les méthodes directes, consistant à effectuer les mesures au sein même de l'atmosphère, permettent une simplification des procédés et des matériels en

autorisant généralement une meilleure sensibilité et une plus grande précision.
Il faut tenir compte de la rentabilité dans le choix de la méthode sans oublier que, dans le cas des mesures directes (qui doivent être multiples pour être utiles), le matériel est souvent perdu définitivement après chaque série de mesures.

Les radiosondes

Les mesures de la pression, de la température et de l'humidité de l'air s'effectuent simultanément par des appareillages entraînés dans l'atmosphère, en général au moyen de ballons.
Après les premières observations effectuées à l'aide d'appareils enregistreurs qu'il fallait récupérer après les vols, il apparut nécessaire de ne plus être tributaire de cette opération problématique. La transmission des mesures par moyens radioélectriques a été réalisée en France dès 1927 et les spécialistes des mesures en altitude ont ainsi été parmi les premiers à utiliser l'électronique en météorologie.
L'appareil classique employé pour ce travail se nomme « radiosonde » et comporte une chaîne classique de télémesure, à savoir :
— plusieurs capteurs judicieusement choisis pour qu'une de leurs caractéristiques mécaniques ou électriques soit tributaire de la variable à mesurer ;
— un dispositif transformant les caractéristiques variables des capteurs en variations radioélectriques. Ce sont les « transducteurs » ;
— un émetteur de signaux radioélectriques attaqué directement par les transducteurs, ou indirectement par l'intermédiaire d'un codeur électromécanique ou électronique. Cet émetteur de signaux assure la liaison entre la radiosonde et le sol pendant toute la durée du vol.
Lors de l'ascension du ballon, ce dernier (avec la radiosonde) est entraîné par le vent. L'ensemble devient donc un traceur pour la mesure du vent en altitude. Les variables mesurées ainsi aux divers niveaux sont donc : pression, température, humidité, vitesse et direction du vent.
Le domaine d'investigation de l'atmosphère par radiosondage est celui compris dans la couche 0 à 30 km. Certains ballons de hautes performances permettent d'atteindre 45 km.
Du fait de la grande consommation qui en est faite, la radiosonde de réseau doit être un appareil de série (18 000 radiosondes sont utilisées actuellement chaque année dans le réseau français). Cet instrument doit être suffisamment précis, léger et peu coûteux. Ses

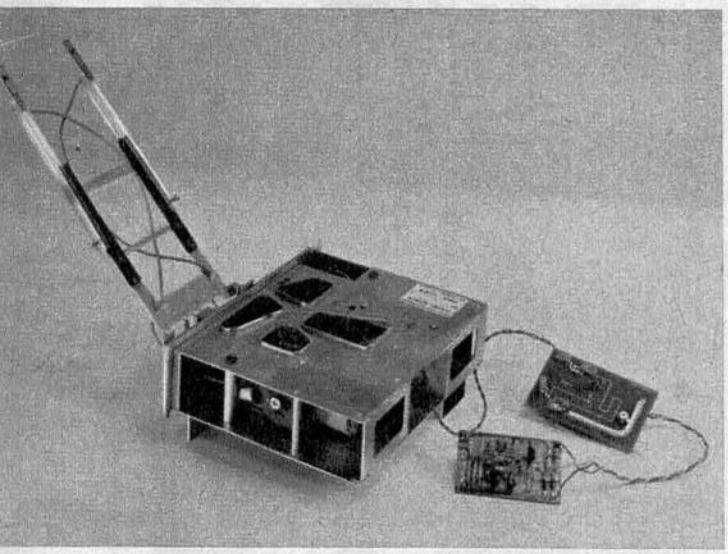


Une radiosonde classique : on remarque la cheminée pare-soleil du thermomètre et l'antenne d'émission.

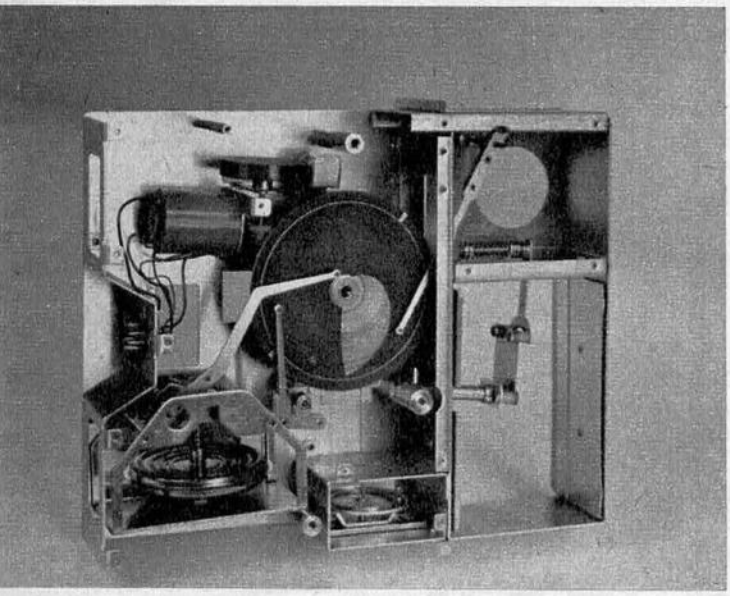
conditions d'utilisation sont très dures et concernent en particulier la conservation des étalonnages dans le temps, et après transport, dans de vastes gammes de mesure : + 50 °C à — 100 °C pour la température ; 10 à 100 % pour l'humidité ; 1 000 à 10 mb pour la pression.
Les vitesses ascensionnelles obtenues avec les ballons habituellement utilisés (en latex ou en néoprène) sont en moyenne de l'ordre de 300 m par minute. La durée d'un sondage est ainsi de l'ordre de 1 h 30 à 2 h et les distances obliques atteintes peuvent être de 150 à 300 km. Ces distances limites conditionnent les performances quant à la puissance rayonnée par l'émetteur et à la sensibilité des appareils de réception et d'enregistrement des signaux au sol.

La mesure du vent en altitude

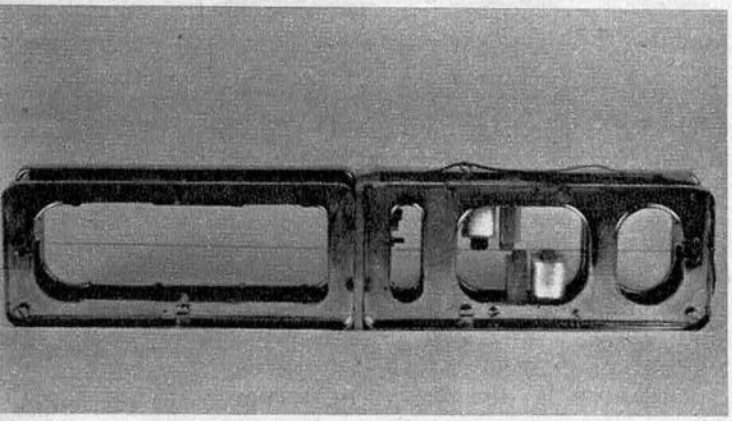
La vitesse et la direction du vent sont, nous l'avons vu, déterminées d'après la trajectoire du ballon, elle-même connue en repérant avec précision, à chaque minute, les coordonnées du ballon dans l'espace. La projection horizontale de cette trajectoire en fonction de l'altitude permet le calcul des *vecteurs vent*, ces derniers obtenus en joignant deux points consécutifs de la trajectoire, le premier pris à un instant T, et le suivant à l'instant T + 1 minute. Ainsi se trouve caractérisé le vent moyen dans chaque couche d'épaisseur correspondant à la distance verticale parcourue par le ballon pendant cette minute, généralement de l'ordre de 300 à 400 m.



Une radiosonde avec capteur thermométrique du type à thermistance et émetteur, 400 MHz.



Une radiosonde avec capteur thermométrique à lame bimétallique. Au centre, le plateau codeur.



Destiné à l'équipement des sondes dites « basses couches », un capteur de température à fil vibrant.

La détermination des coordonnées du ballon peut s'effectuer : soit par poursuite optique à l'aide d'un théodolite (mais ce procédé n'est utilisables que par ciel clair), soit par localisation radioélectrique de l'émetteur de la radiosonde, à l'aide d'un radiogoniomètre ou d'un radiothéodolite.

Si on adjoint à l'équipage ballon-radiosonde un réflecteur passif ou un répondeur actif, sa localisation devient possible en utilisant des radars primaires ou secondaires.

Pour déterminer la position dans l'espace, il est nécessaire de connaître trois paramètres. En plus des angles de site et d'azimut fixant la direction relative, on utilise, pour les deux premiers cas, l'altitude qui est calculée suivant la loi de Laplace à partir des données de pression, température et humidité transmises par la radiosonde. Dans le cas de la localisation radar, à la place de la donnée altitude, on utilise la distance oblique mesurée directement. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide du radar secondaire, couplé à l'utilisation de réflecteurs actifs, généralement sous forme de transpondeurs. La distance oblique est alors directement liée à la différence de phase entre un signal émis du sol sur 400 MHz et la réponse reçue sur 1 680 MHz après passage par le récepteur — émetteur (transpondeur) entraîné par le ballon. Les angles peuvent être connus à 0,05° près et la distance oblique à une dizaine de mètres près. La portée utile peut atteindre 200 km. Le vent moyen dans les couches atmosphériques successives peut ainsi être apprécié à environ 5° près quant à sa direction et à 1 ou 2 m/s près quant à sa vitesse.

L'automatisation complète des mesures de vent est réalisée sur ce type d'appareillage dont l'exploitation s'avère cependant plus coûteuse que celle des radars de poursuite, également automatisables, couramment utilisés en France. Notons à leur propos que la longueur d'onde utilisée est encore de 3 cm, avec une puissance de crête de 80 kW ; la portée utile dépasse 100 km, les précisions angulaires restant de l'ordre de 0,1°. Un nouveau radar, fonctionnant sur 10 cm et entièrement automatique, permet d'atteindre 150 km de distance oblique avec les réflecteurs passifs habituels.

Comment fonctionne une radiosonde

La radiosonde de réseau utilise comme capteurs une thermistance (pour la température), une capsule anéroïde (pour la pression) et un hygromètre à baudruche (pour l'humidité relative).

Les valeurs successives de la thermistance thermométrique sont converties en fréquence

par un multivibrateur à transistor dans la gamme 4 000 à 8 000 Hz ; la précision de mesure atteint 0,5° C. Cette fréquence module en amplitude (à 100 %) une porteuse sur 403 MHz. La portée utile est de 200 km avec le récepteur approprié.

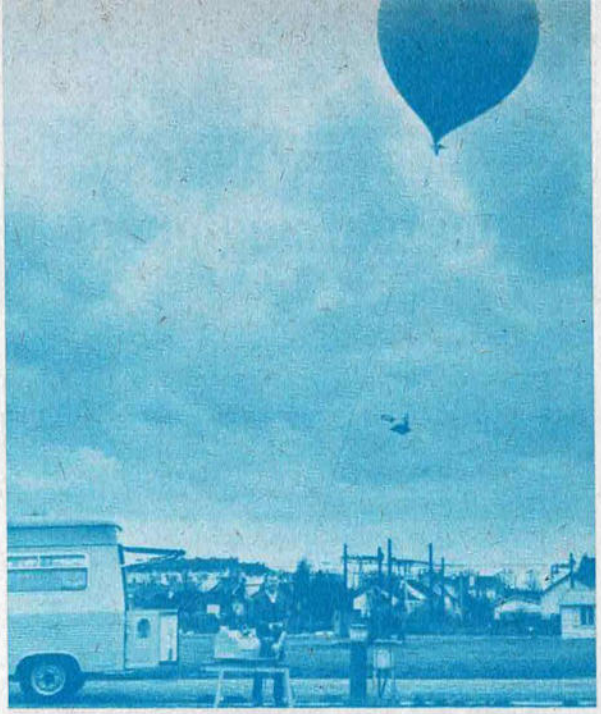
Les données de pression et humidité sont transmises suivant un code. Deux styles à contacts électriques sont liés chacun, par un amplificateur mécanique à levier, respectivement à chaque capteur. Leurs points de contact se déplacent sur un disque isolant portant un secteur conducteur, limité d'une part par un arc de cercle passant par le centre du plateau, et d'autre part par une spirale construite sur le rayon du disque pour une rotation de 180°. Le disque est entraîné par un petit moteur électrique et sa rotation est liée à celle d'un générateur magnétique d'impulsions. La position de chaque style est donc convertie, par la longueur de l'arc correspondant sur la partie conductrice, en une valeur angulaire caractérisée par un nombre d'impulsions (800 pour 180°). Ce système codeur délivre finalement des trains d'impulsions qui fournissent une deuxième modulation en amplitude de l'émetteur, à fréquence basse (70 périodes environ), représentant successivement les mesures d'humidité et de pression. Une impulsion représente une variation de 1 % pour l'humidité relative ou une variation de 3 mb (à 1 000 mb) ou de 1 mb (à 10 mb) pour la pression. Un cycle complet de mesures pression-température-humidité est transmis environ toutes les 20 secondes, c'est-à-dire tous les 10 m environ. La radiosonde en ordre de marche pèse 900 grammes.

A la réception, un même ensemble de comptage fonctionne alternativement en comptage des trains d'impulsions (pression, humidité) et en comptage de fréquence sur 1 seconde (mesure de la température). Il est associé à un enregistreur à trois courbes.

La sonde « basse couche »

Un modèle de radiosonde adapté à des mesures fines entre le sol et 1 500 m a été réalisé sur le principe de transducteur à fil vibrant. Dans ce cas, on utilise la variation de la fréquence de vibration d'un fil fin tendu dans un bâti indéformable ; la tension du fil est déterminée par la position de l'extrémité libre d'un capteur à déplacement.

Le capteur thermométrique est constitué d'un fil d'acier inoxydable de 0,1 mm de diamètre et 80 mm de longueur. Le capteur hygrométrique est une baudruche et le capteur de pression une capsule anéroïde. La précision des mesures atteint 0,2 °C en température, 0,3 mb en pression, et 1 % en humidité.



Les sondages fins à basse altitude (0-1 500 m) utilisent des radiosondes avec ballon captif.

La transmission des trois fréquences de modulation s'effectue simultanément par un émetteur fonctionnant dans la bande 402-406 MHz. A la réception, on peut obtenir des indications continues des trois données.

La sonde basse couche est remorquée par un ballon ou une saucisse et un câble retient l'ensemble au sol.

La mesure de vent peut être effectuée au cours de l'ascension en adjoignant à la sonde un anémomètre léger à contacts, produisant des impulsions à une fréquence caractéristique de la vitesse du vent. La direction en est donnée, au sol, par la position du guide tournant sur lequel passe le câble de retenue.

Ce modèle de sonde répond en particulier aux besoins des études de pollution (détermination des surfaces d'inversion).

Les sondages à plafonnement

Il est possible d'utiliser les radiosondes pour étudier le vent, la température et l'humidité à niveau constant. Les équipements emportés restent identiques aux précédents, mais les postes de réception au sol doivent se relayer lorsque la sonde s'éloigne.

Les ballons sont du type « plafonnants », étanches, indilatables, réalisés en matière plastique (Mylar) et fonctionnant éventuellement en « pressurisation ». Le volume de l'enveloppe et le contenu en hydrogène sont prévus pour le niveau d'exploration désiré. Selon l'altitude, de tels ballons peuvent tenir l'air de plusieurs mois (100 mb) à une quinzaine de jours (700 mb).

André VALENTIN

Les satellites météorologiques

Un système idéal d'observation de l'atmosphère devrait réunir trois ordres de qualités :

— continuité dans l'espace géographique et dans le temps ;
— précision et cohérence des mesures ;
— rapidité de la collecte et de la transmission des données aux utilisateurs.

On reconnaît que le satellite artificiel est en mesure de remplir ces conditions.

D'abord, sa vision s'étend à toute la surface du globe. Un seul satellite en orbite polaire couvre deux fois par jour la superficie terrestre. Un satellite géostationnaire, à 36 000 km d'altitude sur l'équateur, tient dans son champ visuel un tiers de la planète. Quatre satellites géostationnaires, régulièrement espacés autour de la Terre, en contrôleraient toute l'étendue à l'exception des calottes polaires. La stationnarité par rapport à la Terre permet, par ailleurs, d'assurer la permanence absolue de l'observation. Une telle permanence a son prix lorsqu'il s'agit de surveiller des phénomènes à évolution rapide, comme les cyclones tropicaux ; mais on peut se contenter, en général, d'intervalles d'observation de 3 heures à 6 heures (intervalles dits synoptiques). Les satellites à défilement satisfont alors aux besoins, soit en orbite équatoriale, soit en orbite polaire (en utilisant deux satellites en quadrature).

Le Centre de Lannion participe aux prévisions. Ci-dessus, les installations de réception des satellites.

La cohérence des observations et des mesures constitue un deuxième caractère du satellite météorologique. Echappant à toutes les difficultés géopolitiques, il fournit un renseignement constamment comparable à lui-même, étalonné par référence à un standard unique. On reviendra plus loin sur la précision que l'on peut attendre de ce renseignement.

Enfin, le satellite est certainement le plus rapide agent de collecte et de diffusion des données météorologiques. On sait combien ce type d'information se périme rapidement. Le satellite peut remplir cette condition essentielle de deux manières. S'il est géostationnaire, il peut constituer un simple relais opérant « en temps réel ». S'il est en défilement sur orbite basse, il stocke l'information captée dans une mémoire du bord pour la délivrer sur commande à son passage en visibilité d'une station terrestre. C'est alors une procédure de transcription point à point.

Il existe une formule intermédiaire permettant une diffusion générale en direct ou en différé léger ; cette télémesure, qui permet d'informer dans un minimum de temps un très grand nombre de stations (et par là même de pays), porte le nom générique de « APT » (Automatic Picture Transmission).

Si nous considérons maintenant les méthodes employées pour sonder l'atmosphère à distance depuis l'engin spatial, il existe, en réalité, deux modes d'action essentiels.

Le premier consiste à tirer renseignement des rayonnements transmis par l'atmosphère. Le satellite est, en ce cas, du type radiométrique ; sa fonction sensorielle s'apparente à celle de l'œil humain, mais avec un registre spectral plus étendu et une précision photométrique sensiblement améliorée.

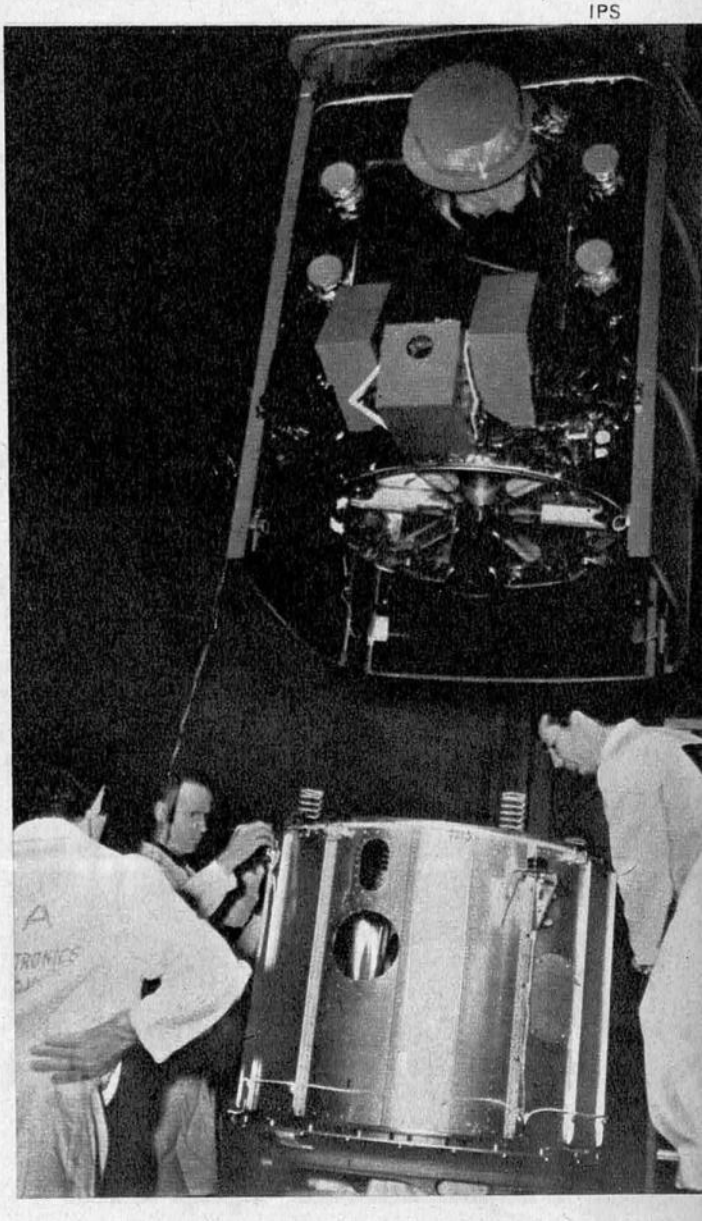
Le deuxième mode d'action mériterait le qualificatif d'indirect, puisque l'on fait appel à des capteurs classiques, opérant au sein de l'atmosphère. Le satellite joue alors le rôle de collecteur (sur télécommande radio), et accessoirement de « localiseur » de la plateforme de mesure.

Il est clair que les deux modes d'action sont complémentaires, parce que certaines zones atmosphériques, comme la couche-limite au plus près du sol, sont peu accessibles à la radiométrie, et parce que la mesure du vent ne peut se faire autrement qu'à partir de traceurs artificiels (ballons plafonnants) immergés dans l'atmosphère.

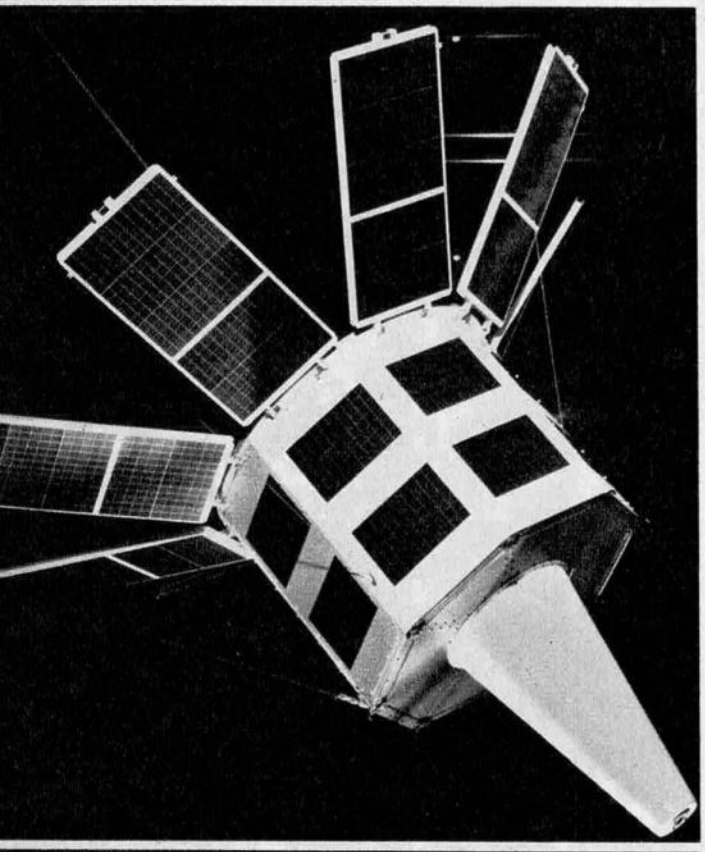
La première illustration des techniques radiométriques nous est donnée par l'observation des masses nuageuses, le jour ; il s'agit d'une véritable photographie, le rayonnement transmis n'étant autre que le rayonnement solaire rétrodiffusé. Le détecteur peut être en ce cas une caméra électronique à tube vidicon ; on

préfère maintenant la photodiode au foyer d'un réflecteur télescope balayant la scène atmosphérique.
Pour aller plus loin, et observer les nuages de nuit, on utilise le rayonnement propre de ces nuages, qui se situe dans l'infrarouge. Le même système de balayage optique peut servir, mais le détecteur est alors du type quantique ; il faut le refroidir suffisamment (et jusqu'à la température de l'azote liquide) pour obtenir une sensibilité convenable.
La mesure en infrarouge est d'intérêt général du point de vue de la météorologie spatiale. Dans le cas précité, les senseurs du bord travaillent dans une bande spectrale relativement étroite correspondant à une « fenêtre » de transparence atmosphérique. L'atmosphère, on le sait, est généralement très opaque à l'infrarouge ; de telles « fenêtres » correspondent à un minimum d'atténuation du rayonnement transmis pendant son parcours atmosphérique. L'énergie captée par le radiomètre s'identifie alors, à quelques corrections près, à l'énergie émise par la cible.
Cette cible est elle-même le sommet des nuages ou la surface terrestre, généralement la surface océanique. Remontant, par la loi de Planck, de l'énergie émise à la température de l'émetteur, on peut connaître celle-ci avec une précision honorable (de l'ordre du degré). Notons l'intérêt particulier de cette évaluation dans le cas de l'océan, dont la température intervient directement en ce qui concerne les échanges avec l'atmosphère. Du point de vue océanographique, certaines espèces de poissons recherchent un habitat à température déterminée : la mesure de température par satellite trouve ainsi une application à la pêche en haute mer.
On peut, de manière en quelque sorte symétrique, utiliser les propriétés absorbantes de certains composants atmosphériques mineurs, et spécialement du gaz carbonique qui présente l'avantage d'une concentration constante dans l'atmosphère. L'émission totale de l'atmosphère dans les raies infrarouges de ce gaz porte la signature d'une certaine structure thermique des couches traversées à partir du niveau d'émergence du rayonnement. On saura retrouver cette structure thermique par un procédé d'inversion analytique, en mesurant l'énergie transmise dans un certain nombre de telles raies. Cette méthode, qui paraît a priori sujette à de nombreuses limitations, s'est révélée dès la première expérimentation (Nimbus III, printemps 1969) d'une efficacité et d'une précision remarquables, et fournit depuis lors la matière de 3 000 « radiosondages » par jour sur toute la surface du globe.
La technique radiométrique s'étend évidemment au-delà et en deça du spectre visible et infrarouge. L'ultraviolet renseigne sur la distribution de l'ozone.
Le rayonnement dans les bandes des radiofréquences apparaît prometteur. En effet, ce rayonnement a une meilleure pénétration que l'infrarouge dans les nuages et peut conduire à une détermination de leur teneur en eau en même temps qu'à la connaissance des zones de pluie (projet Hirondelle de la Météorologie Nationale). La technologie des ondes millimétriques et centimétriques devra être affinée en conséquence.
Nous ne nous étendrons pas sur les satellites de collecte des données. Celles-ci peuvent être

IPS



Un des derniers satellites spécialisés mis en service, Tiros M, à la fin des opérations de montage. La caméra occupe le centre d'un dispositif de stabilisation en forme de roue, à la base de l'engin.



Les deux éléments de base du projet Eole. Le satellite, de 80 kg environ, équipé de huit panneaux de cellules solaires, qui sera placé sur une orbite circulaire à 900 km d'altitude. Sa fonction sera d'interroger et de localiser chacun des ballons (350 au total) à environ 100 minutes d'intervalle. Quant aux ballons eux-mêmes, qui devront dériver à plafond constant (vers 12 000 m), la réalisation de leur enveloppe a posé des problèmes.

Documents CNES

acquises soit par des plates-formes fixes ou d'adresse connue (stations terrestres, stations sur navires), soit par des plates-formes dérivantes (bouées marines, ballons). Dans ce dernier cas, le satellite, outre son rôle d'interrogateur des plates-formes, doit les localiser.

Ce problème a été particulièrement traité par les Américains — projets IRLS (Interrogation, Recording and Location Subsystems) et OPLE (Omega Position Location Equipment — et par les Français dans le projet Eole. Le satellite Eole devra positionner à intervalles une flottille de ballons dérivant à niveau constant ; la mesure de cette dérive s'identifie à celle du vent, paramètre recherché.

Ce lancement ne sera pas isolé. Depuis le premier Tiros, en 1960, les satellites météorologiques ont pris, en effet, un développement rapidement croissant. La série américaine des Tiros a été suivie de celle des Nimbus, puis des ESSA, opérationnels à partir de 1966. On a connu parallèlement des expériences météorologiques sur les satellites géostationnaires ATS. Les ESSA et les ATS seront remplacés en 1971-1972 par des ITOS et des GEOS, plus performants. Du côté soviétique, la série Cosmos-Meteor est devenue opérationnelle en 1969. La France s'est associée à cette expansion technique et scientifique en créant en 1963 le Centre d'Etudes Météorologiques Spatiales, à Lannion. Le Centre de Lannion reçoit, décode, et traite les télémesures des satellites opérationnels au profit du Service central des prévisions de Paris. Simultanément, il mène un certain nombre d'études de pointe.

La France a manifesté, par ailleurs, son désir de s'associer aux grandes réalisations de la Veille Météorologique Mondiale. Sa première participation consistera, vraisemblablement, dans la mise en orbite d'un satellite géostationnaire, homologue des GEOS américains. Cet engin, baptisé Meteosat, serait placé sur l'équateur, à hauteur du méridien-origine. Il pourrait, de la sorte, surveiller de jour et de nuit les grands mouvements des perturbations sur l'Eurafrique et l'Atlantique.

A. VILLEVIEILLE

Les données sur les océans

Au large des Antilles, sur 500 000 km², un vaste programme d'études météo-océanographiques a rassemblé l'an dernier des navires tels que le Discoverer, ci-contre.

IPS

Les marins possèdent les séries d'observations météorologiques les plus anciennes qui aient été faites systématiquement. De tout temps, sur les mers du globe, un navire a été un observatoire flottant, les observations étant consignées sur les livres de bord.

Au milieu du XIX^e siècle, l'Officier de Marine américain Maury se livra à un énorme travail de dépouillement de toutes les données disponibles, travail d'exploitation statistique qui permit la publication des fameuses « *Sailing directions* », premier grand ouvrage de climatologie maritime. Livre de chevet de plusieurs générations de marins, il permit de déterminer des routes maritimes favorables. Il est de fait que les « clippers » de l'époque assuraient sur certains trajets des liaisons en des temps comparables à ceux de navires actuels. Ultérieurement, au cours de la seconde moitié du siècle, ces travaux furent complétés, notamment par les Français Brault et Teisserenc de Bort.

Vers la même époque naissait la météorologie synoptique, sous l'impulsion du directeur de l'Observatoire de Paris, le célèbre astronome Le Verrier, avec la création d'un service de prévision des tempêtes.

Il fallut cependant attendre les années 1920, époque à laquelle les moyens de télécommunication se développèrent considérablement et où débutèrent les vols transatlantiques, pour que l'on commençât le rassemblement des observations maritimes sous une forme synoptique. A partir de 1926, l'Office National Météorologique (O.N.M.) utilisa les services de navires au long cours travaillant en stations météorologiques. Ceux-ci effectuèrent nombre d'observations précieuses et sûres. Citons le « Jacques-Cartier », le « Cuba », le « Flandre ». En 1937 était mis en service le premier navire météorologique stationnaire, le « Carimaré », étape importante dans l'organisation rationnelle du réseau météorologique en mer. Stationné à quelque 800 milles dans l'ouest-sud-ouest des Açores, ce navire effectuait non seulement des observations, mais se chargeait encore de la concentration des messages météorologiques depuis les navires et de leur transmission vers Paris.

Après la dernière guerre, le développement des techniques, et l'importance accrue accordée à la météorologie maritime dans tous les domaines, conduisirent à l'établissement d'une organisation qui ne cesse de se développer. Les problèmes posés par l'acquisition des données en mer sont particulièrement ardus, du fait, d'une part, de l'immensité du champ d'observation (les mers couvrent 71 % de la surface du globe), d'autre part, de la spécificité de l'instrumentation marine.

Le réseau d'observation et de mesures comprend des Navires Météorologiques Stationnaires (N.M.S.), stations spécialisées à poste fixe qui constituent en quelque sorte l'arma-

ture du réseau, mais dont la densité est nettement insuffisante. D'autres plates-formes, parmi lesquelles des navires en route, apportent une aide essentielle à la météorologie synoptique.

Des instruments plus ou moins spécialisés

Bien que les stations en mer procèdent à peu près aux mêmes mesures et observations que les stations terrestres, une adaptation des instruments au milieu océanique s'impose. Les instruments doivent notamment avoir une bonne tenue à l'air salin et une conception simple et robuste tenant compte des conditions particulières d'installation (sur une plate-forme mobile soumise à des accélérations perturbant les conditions de mesure). De plus, l'observation marine nécessite l'emploi d'appareils inconnus dans une station terrestre, destinés à la mesure des vagues et de la température de l'eau.

En fait, les instruments utilisés pour la mesure d'un même élément peuvent être de conception plus ou moins élaborée suivant la catégorie du navire observateur. A bord des navires modernes automatisés, on s'efforce de concentrer tous les indicateurs de mesures en un même endroit, en général la passerelle, les capteurs étant placés de manière à être soustraits aux effets des superstructures. La mesure de la pression est réalisée à partir d'un baromètre anéroïde dont le boîtier est suspendu par un système de ressorts et de caoutchouc mousse qui rend l'instrument moins sensible aux vibrations et aux chocs. La tendance barométrique est lue sur un baromètre enregistreur de construction classique.

La Météorologie Nationale vient de mettre au point un barographe spécialement conçu pour la mer, amorti de manière convenable, équilibré dynamiquement et placé sous coffret étanche mis en communication avec l'air par un fin gicleur permettant une intégration des fluctuations de pression provenant des mouvements du bateau et de la houle.

La température et l'humidité de l'air sont le plus souvent déterminées en utilisant un psychromètre crécelle. Les navires spécialisés utilisent des psychromètres fixes installés dans deux abris, à bâbord et à tribord, la sélection étant faite compte tenu de leur exposition aux conditions du moment.

Le *vent relatif* se mesure à l'aide des anémomètres et girouettes habituels, mais l'appréciation correcte du *vent vrai* nécessite des corrections tenant compte du cap et de la vitesse du navire (les navires utilisent un « plateau calculateur » conçu par la Météorologie Nationale).

L'implantation correcte des capteurs de vent reste délicate par suite des turbulences induites par le navire et ses superstructures ; l'installation de plusieurs ensembles est parfois indispensable, permettant une sélection rationnelle. La télémesure est naturellement nécessaire et l'intégration sur la durée d'une minute apparaît souvent souhaitable.

Les mesures de température de l'eau

La température de surface peut être mesurée à l'aide de divers dispositifs. Le *thermomètre plongeur* antichoc comporte un seau caoutchouté de petites dimensions dans lequel est fixé élastiquement un thermomètre de bonne sensibilité. On plonge l'ensemble dans la mer, à partir du pont, en prenant quelques précautions quant à l'insolation et à l'environnement immédiat. Mais le dispositif le plus utilisé à bord des navires français est le thermomètre *à la prise d'eau :* un thermomètre de précision est installé sur une conduite d'arrivée d'eau de circulation à la machine. Certains navires sont équipés de deux ensembles, permettant une sélection suivant le tirant d'eau du moment et la disponibilité du conduit de circulation. Quelques navires spécialisés utilisent des thermomètres à *thermorésistance*, avec affichage à la passerelle, dispositif qui se généralise à bord des navires automatisés. Il existe un dernier procédé de mesure moins étroitement rattaché au réseau maritime. Il s'agit de la mesure de la température de surface par radiométrie infrarouge à partir d'avions ou de satellites. En liaison avec d'autres organismes, la Météorologie Nationale poursuit d'actives études dans ce domaine, en particulier à l'occasion de campagnes océanographiques.

En profondeur, la température de la mer est souvent mesurée au moyen de *bathythermographes.* Ces appareils permettent d'enregistrer la température sur une profondeur de quelques dizaines ou centaines de mètres. Le modèle le plus employé comporte une thermistance de forme hydrodynamique, larguée vers les profondeurs au moment des observations et reliée au navire par un câble conducteur. La température en fonction de l'immersion apparaît automatiquement sur l'enregistreur de bord.

Quelques données d'établissement complexe

Les mesures des précipitations en mer sont particulièrement délicates. La mise au point de techniques appropriées fait l'objet d'études

très poussées dans le cadre de l'Organisation Météorologique Mondiale. L'enjeu est d'importance, car une meilleure connaissance de la pluviométrie dans les zones océaniques est essentielle pour l'étude des interactions océan-atmosphère.

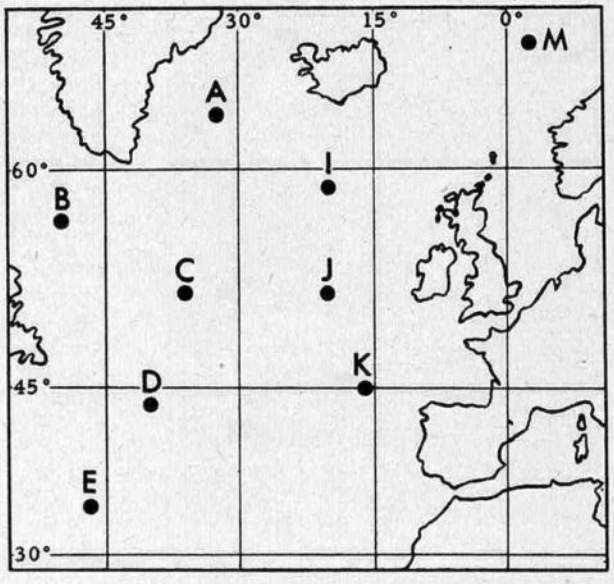
En ce qui concerne les mesures en altitude, aucune difficulté particulière ne se présente pour la pression, la température et l'humidité, sinon celle du stockage de l'hydrogène et de l'existence d'une plage suffisante pour les lâchers de ballons. La mesure du vent en altitude reste par contre difficile : par suite de la non-fixité du navire, cap, roulis, tangage et mouvement de lacet doivent être pris en compte pour une localisation précise du ballon. Celle-ci peut être réalisée à l'aide d'un radar monté sur plate-forme stabilisée et couplée à un calculateur ou au moyen d'un radar de poursuite automatique non stabilisé, dont les indications sont traitées par un ensemble calculateur recevant toutes les données relatives à l'attitude du navire et à son déplacement. La mise au point récente de récepteurs spéciaux entraînés par ballon semble devoir permettre l'utilisation de certaines chaînes de radionavigation (Loran, Omega) et une simplification considérable des installations à bord.

A bord de la plupart des navires français, les vagues sont estimées visuellement. Il n'existe encore actuellement aucun appareil simple permettant de bonnes mesures sur un navire en route. Les marins réussissent à chiffrer avec une assez bonne précision direction, période et hauteur de la houle et de la mer du vent. Quelques unités spécialisées sont dotées d'un enregistreur Tucker qui mesure la hauteur d'une vague par la pression hydrostatique qu'elle exerce au niveau d'une prise manométrique ménagée dans la coque à 4 m environ sous la ligne de flottaison. L'appareil comporte aussi un accéléromètre donnant la composante verticale du mouvement et un calculateur. Ce dernier, en intégrant deux fois l'accélération verticale, permet de mesurer la hauteur d'une vague par rapport à un repère conventionnel lié à la Terre.

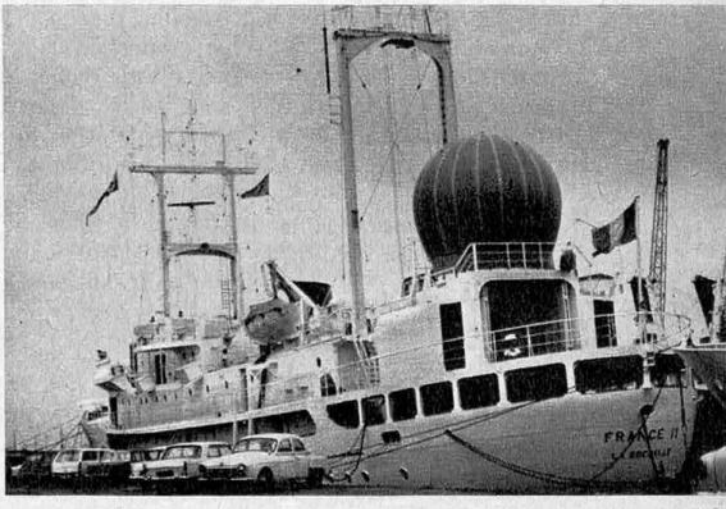
Navires stationnaires et navires sélectionnés

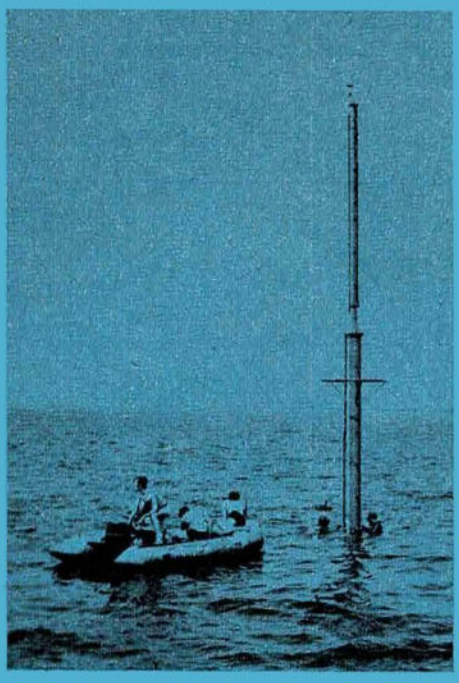
Les besoins de plus en plus importants de l'aéronautique ont conduit l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale à créer dès 1947 un réseau de stations océaniques fixes, réparties sur les grands axes de la navigation aérienne. Un accord charge l'Organisation Météorologique Mondiale de l'exploitation de ces stations qui effectuent des observations en surface et en altitude.

Le réseau comprend 12 unités, toutes stationnées dans l'hémisphère Nord, dont 9 dans l'Atlantique. La France participe à ce réseau avec ses « France I » et « France II », bâtiments déplaçant 2 050 tonnes en pleine charge, spécialement conçus pour la météorologie maritime. L'armement de chaque unité comprend des personnels de la Météorologie Nationale et de la Navigation aérienne, dirigés par un météorologiste chef de mission, et des personnels de la Marine marchande. Ces unités sont à la mer chacune 245 jours par an et assurent la veille aux points A (62° N - 33° W), J (52° 30 N - 20° W) et K (45° N - 16° W), en alternance avec des bâtiments anglais et hollandais.

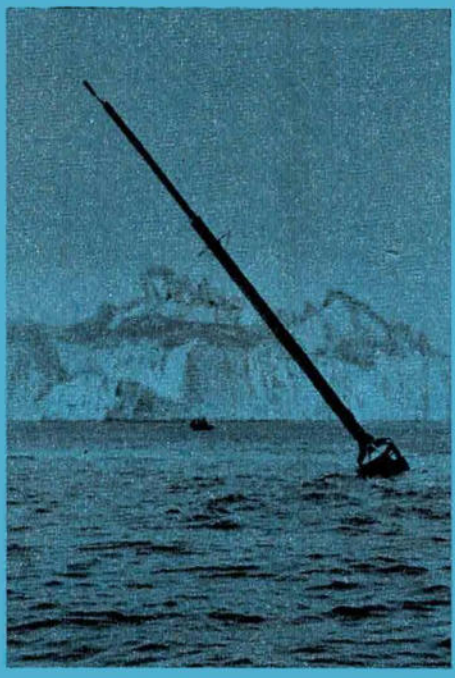


Organisé sur une base internationale, le réseau de navires météorologiques stationnaires compte 9 unités dans l'Atlantique Nord (carte ci-dessus). La France participe au réseau avec le France I et le France II. Les équipages sont fournis par la Marine Marchande et par la Météorologie Nationale.





Trois étapes de la mise en place d'une bouée météo - océanographique destinée à l'étude des conditions locales en vue d'implanter des plates-formes de forage pétrolier. Remorquée jusqu'à la position prévue, la bouée est redressée par ballastage, coulée dans sa position définitive, et ancrée. La partie inférieure immergée comporte des courantomètres et des appareils de mesure de la houle. Le mât sera équipé ultérieurement de capteurs de pression, anémomètres, etc. Il s'agit ici d'un engin prototype réalisé par la COMEX.



Quelle que soit la qualité des renseignements fournis par les navires stationnaires, le réseau est trop peu étoffé pour répondre à l'ensemble des besoins. Pour cette raison, on a recours aux services d'autres bâtiments.

Chaque pays maritime, membre de l'Organisation Météorologique Mondiale, recrute des navires battant pavillon national pour effectuer des observations météorologiques ; ces navires sont dit « navires sélectionnés ».

Actuellement au nombre de 4 500 dans le monde, ils sont désignés par libre accord entre les armateurs et les services météorologiques nationaux. Les bâtiments en question sont tenus d'effectuer, d'enregistrer et de transmettre les observations météorologiques de surface. La contribution de la France est de 200 navires qui exécutent annuellement quelque 100 000 observations.

Les agents de port

Afin de permettre des contacts suivis entre les navires sélectionnés et le Service météorologique, des météorologistes sont affectés dans les principaux ports. Ces « agents de port » visitent les navires, mettent en place et vérifient le matériel, livrent la documentation correspondante, conseillent les équipages et les opérateurs-radio et procèdent au réglement des indemnités pour le travail effectué à bord. Les agents de port sont aussi à la disposition de tout navire pour fournir les renseignements météorologiques nécessaires aux traversées et, en particulier, pour communiquer avant l'appareillage les dernières cartes en surface et les prévisions.

Les ports français disposant d'agents sont au nombre de treize. Sept ont un Bureau de renseignements météorologiques à l'intérieur ou à proximité du port (Dunkerque, Boulogne, Le Havre, Brest, La Rochelle, Bordeaux, Marseille) ; trois autres sont desservis par la station météorologique la plus proche (Rouen, Saint-Nazaire, Donges) ; trois, enfin (Dieppe, Lavera, Port-de-Bouc), reçoivent éventuellement la visite des météorologistes des stations de proximité relative (Rouen pour Dieppe ; Marseille pour Lavera et Port-de-Bouc).

Les bâtiments de guerre

Les bâtiments de guerre, parmi lesquels une dizaine de grandes unités sont dotées de météorologistes spécialisés, exécutent eux aussi des observations météorologiques complètes et, éventuellement des mesures en altitude. L'intérêt des renseignements collectés provient surtout du fait que ces bâtiments, à la différence des navires de commerce, naviguent souvent dans des zones peu fréquentées. Leur contribution devient donc essentielle pour la connaissance de vastes zones océaniques encore inexplorées.

Certains bâtiments disposent d'une station météorologique importante destinée à leur activité propre. C'est le cas des porte-avions qui doivent connaître à tout moment la situation météorologique maritime et aéronautique. Quant au bâtiment réceptacle « Henri Poincaré », il possède une des stations les plus modernes du monde et dispose même d'une installation de lancement de fusées météorologiques.

Bateaux-feux et bateaux-pilotes

La collaboration des bateaux-feux et des bateaux-pilotes, déjà appréciée en météorologie synoptique, est fort intéressante en ce qui concerne l'exploitation climatologique. Ces unités, qui exécutent presque toutes les observations synoptiques de surface, occupent en permanence des points fixes en zones littorales ou proches du littoral où les conditions météorologiques diffèrent souvent notablement de celles régnant à la côte ou au large. Or, on sait que certaines industries attachent une grande importance aux éléments climatiques régnant sur le plateau continental.

Les unités actuellement en service en France sont le bateau-feu « Sandettie » (en plein milieu du Pas-de-Calais, sur le banc du même nom), le bateau-feu « Dyck » (au large de Calais, à 3 milles de la côte), le bateau-feu « Le Havre III » (au large du Havre, à 10 milles de la côte), le bateau-feu « Bassurelle » (en Manche, à mi-chemin entre la France et l'Angleterre, à l'ouvert du Pas-de-Calais), le bateau-pilote de la Gironde, qui stationne à l'embouchure de l'estuaire, un peu au large.

Les bouées-laboratoire

La bouée-laboratoire du CNEXO, désormais mouillée à 55 milles au sud de Marseille (après avoir été plusieurs années entre Nice et la Corse), est dotée d'une installation météorologique complète, y compris un enregistreur de houle et un pyranographe pour la mesure du rayonnement solaire. Elle constitue un point d'observation extrêmement important, particulièrement en ce qui concerne l'étude des interactions océan-atmosphère.

La densité actuelle du réseau d'observation en surface et en altitude est encore très insuffisante dans le monde. Il existe de très vastes zones, en particulier dans l'hémisphère Sud, où il n'est jamais fait d'observation. Les services de l'O.N.U. ont élaboré un vaste programme de mise en œuvre de stations océaniques, portant sur l'installation de bouées de plusieurs types : côtières ou de haute mer, fixes ou dérivantes, habitées ou non-habitées et dotées de stations automatiques...

En plus de la bouée mouillée en Méditerranée, la France envisage la construction d'une grosse bouée-laboratoire habitée pour l'Atlantique.

En ce qui concerne le réseau de mesures en altitude, un programme mondial en cours d'exécution prévoit la participation des navires marchands. Ces navires pourraient aussi se livrer à des mesures thermiques en profondeur en utilisant le nouveau bathythermographe déjà utilisé en France par de nombreux bâtiments de guerre.

Le réseau de télécommunications

Dans le cadre de l'exploitation synoptique en temps réel, les observations sont concentrées de manière différente suivant la catégorie des navires :

— les navires météorologiques stationnaires transmettent leurs observations à une station britannique ;

— les navires sélectionnés transmettent à des stations dites « radiocôtières » (Boulogne, Le Conquet, Saint-Nazaire, Saint-Lys, Arcachon, Marseille, Grasse) ;

— les bâtiments de guerre transmettent aux stations de la Marine Nationale ;

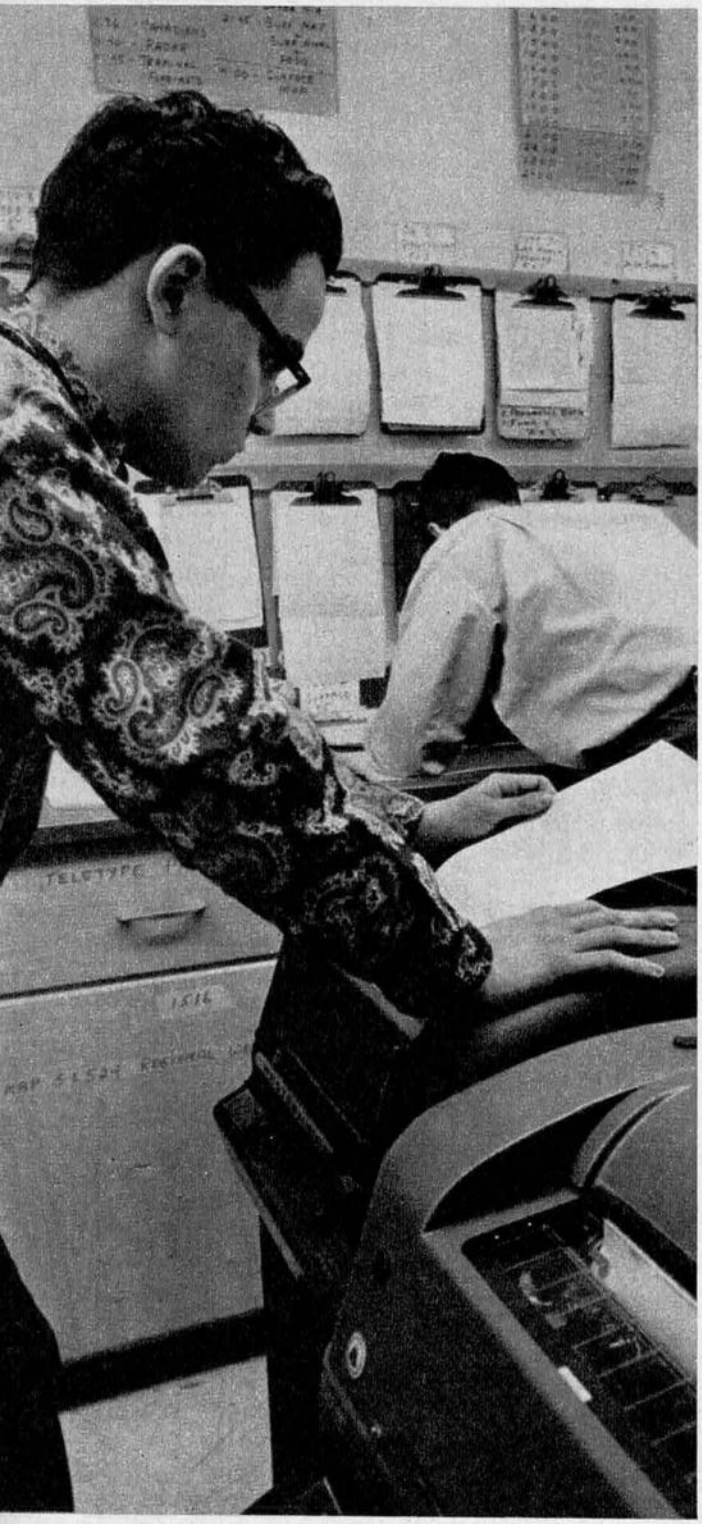
— les bateaux-feux transmettent au Bureau des Phares et Balises.

Toutes ces données, acheminées par différentes voies, parviennent finalement au Service central à Paris. Pour être pleinement utilisables, les renseignements concernant l'exploitation météorologique synoptique doivent être utilisés dans des délais réduits. Aussi les transmissions en matière de météorologie marine sont-elles parvenues à de remarquables performances. La plupart des observations synoptiques effectuées par les navires et retransmises par les stations radiocôtières parviennent à Paris dans des délais qui n'excèdent pas la demi-heure après l'exécution des mesures.

J. ROMER - R. GELCI

Acheminement et traitement des

USIS



Pour la centralisation des données vers les centres de traitement, comme pour la diffusion des prévisions qu'ils élaborent, les transmissions filaires ou radio jouent un rôle essentiel dans tous les pays.

La Météorologie est une entreprise qui a pour but de fournir à sa clientèle un produit élaboré : la prévision du temps.
Pour ce faire, elle dispose d'une matière première : l'ensemble des observations effectuées sur une partie aussi vaste que possible du globe terrestre et qui caractérisent l'état de l'atmosphère à un moment donné. Elles doivent être rassemblées et traitées afin d'aboutir à différents types de prévisions.
Ces prévisions doivent à leur tour être distribuées aux utilisateurs, et ceci au bout d'un temps suffisamment bref pour qu'elles ne soient pas caduques lorsqu'elles atteignent leurs destinataires.
On peut donc assimiler un service météorologique à une entreprise comprenant :
— des points d'extraction de la matière première : le réseau mondial des stations d'observation ;
— un dispositif de rassemblement de la matière première : le réseau mondial des télécommunications météorologiques ;
— une usine de transformation : le centre de calcul ;
— un dispositif de distribution du produit élaboré : le réseau national des télécommunications météorologiques ;
— des points de distribution : le réseau national des stations météorologiques de renseignement.
La Météorologie Nationale est donc une entreprise de transformation de l'information météorologique.

Une denrée périssable

L'information météorologique est avant tout une denrée qui se dégrade très vite.
Elle est utilisée d'abord pour la signalisation. Dans ce cas, l'observation faite à une heure donnée annule celle faite à l'heure ou à la demi-heure précédente. De ce fait, elle doit être rassemblée, traitée, et la signalisation distribuée en moins de trente minutes.
Elle est utilisée ensuite pour élaborer un nouveau type d'information : la prévision. Il est alors évident que le temps de concentration, de traitement et de redistribution doit être inférieur à l'échéance de la prévision elle-même.
Il faut cependant noter que, si l'information se dégrade très vite quand on considère son utilisation pour la signalisation quasi immédiate ou la prévision ,elle conserve une valeur résiduelle pour le chercheur en météorologie

dont l'atmosphère est le vaste laboratoire. A elles seules, les données d'observation qui sont échangées internationalement représentent cinq millions de caractères toutes les vingt-quatre heures, et ce n'est qu'une partie de l'information météorologique.

Les données d'observation en altitude sont issues d'environ 700 stations réparties sur l'ensemble du globe. Pour les observations au sol, 3 000 stations envoient leurs mesures toutes les trois heures. En fait, pour les besoins nationaux, les mesures sont plus nombreuses : 10 000 stations effectuent des observations horaires sur tout le globe. Pour le seul territoire français, les données des quarante dernières années, mises sur cartes perforées, représentent un milliard et demi de caractères.

Pour atteindre le centre de traitement, les données transitent par de nombreux centres et circulent sur des milliers de kilomètres de lignes. C'est dire qu'au cours de ce trajet l'information se dégrade. Quand elle arrive au lieu de traitement, l'information est entachée non seulement des erreurs instrumentales de mesure et de codage, mais aussi d'erreurs de manipulation et de transmission. Avant que commencent les calculs, il faut détecter ces erreurs et si possible les corriger. Il est évident que ces contrôles et ces corrections ne peuvent être faits manuellement, compte tenu de la vitesse de traitement nécessaire. Ils ne peuvent l'être qu'à l'aide d'un calculateur. En fait, si ces corrections sont effectuées au centre de traitement, ce n'est qu'un pis-aller. La détection des erreurs et leur correction reposent sur des méthodes statistiques, ce qui risque d'éliminer certains accidents s'écartant trop des valeurs habituelles et qui sont cependant riches en information. Le système, pour être complet, doit donc évoluer dans un sens tel que toute valeur jugée anormale soit renvoyée à la source même afin d'être confirmée ou corrigée.

Si l'on s'en tient aux seuls calculs de prévision, l'intégration des équations de l'atmosphère, suivant le modèle plus ou moins élaboré qui a été choisi, exige pour une prévision à échéance de 24 heures :

— modèle barotrope : 0,3 milliards d'opérations ;

— modèle barocline : 3 milliards d'opérations ;

— modèle de simulation : 30 milliards d'opérations.

Cela revient à dire que, si les calculs étaient faits par un homme, une prévision à 24 heures demanderait dans le seul premier cas environ un millénaire !

Un produit difficile à distribuer

La plupart des prévisions, du moins dans l'état actuel des techniques, demandent, avant d'être livrées à l'utilisateur, une adaptation faite par des météorologistes. L'information fournie à ces météorologistes doit être distribuée sous une forme facilement interprétable, c'est-à-dire essentiellement sous forme graphique. Lorsqu'on sait que la transmission d'un document graphique en météorologie comporte environ quatre millions de « bits », qu'une prévision, pour être correctement interprétée, nécessite la production de quelques dizaines de documents, cela implique que, quotidiennement, une centaine de fois quatre millions de « bits » soient distribués dans les quelque 150 stations du territoire national. Le système de transmission permettant de diffuser l'information traitée doit, comme celui qui rassemble les données de base, être rapide. Nous avons vu qu'un service météorologique national dépend étroitement de l'ensemble des autres services météorologiques, qu'il doit pouvoir disposer de moyens de transmission rapides et étendus, qu'il doit posséder des moyens de fabrication, c'est-à-dire des moyens de traitement, puissants. Moyens de transmission et moyens de traitement forment un tout qui doit être coordonné à l'échelle mondiale. La nécessité d'une telle coordination a donné naissance à l'Organisation Météorologique Internationale (OMI) qui, après la dernière guerre, s'est transformée en Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Son siège est à Genève.

Dans le cadre de l'OMM est né un vaste projet : la Veille Météorologique Mondiale (VMM), lancée en 1967 après une étude de plusieurs années. Ce projet organise le système de transmission et de traitement des données sur le plan mondial, permettant à chaque pays de résoudre son propre problème sur le plan national.

Le système actuel de télécommunications météorologiques repose sur des transmissions télégraphiques (par lignes terrestres, câbles sous-marins ou par radio). La rapidité de modulation est de 50 ou 75 bauds, ce qui signifie qu'avec l'alphabet international n° 2, la vitesse de transmission est de 6,66 ou 10 caractères

Un récepteur de radiofacsimilé, pour la diffusion des cartes du temps prévu et autres documents graphiques. La bande de transmission est d'environ 3 kHz

par seconde. Ce système permet l'acheminement des données alphanumériques.

Les données graphiques sont transmises essentiellement par radio-facsimilé utilisant une bande de fréquences d'environ 3 kHz. Suivant la finesse des détails de l'image à transmettre, un document de 45 sur 60 cm est acheminé en dix, vingt ou quarante minutes.

Afin de répondre aux besoins des usagers en matière de prévision, il est nécessaire que les données de base soient disponibles, en tous les points où elles doivent être traitées, au plus tard deux heures après que les mesures ont été faites, de telle sorte que les prévisions atteignent les destinataires après seulement quatre heures. Il fallait donc augmenter la vitesse de transmission et la vitesse de traitement. On a convenu que, partout où cela était possible, et principalement pour les liaisons internationales à fort débit, on utiliserait des circuits sur lesquels la rapidité de modulation serait de 1 200 « bits »/seconde, la vitesse de transmission de 1 200 ou 2 400 « bits » par seconde. On obtient ainsi un débit de 150 ou 300 caractères par secondes en utilisant l'alphabet international n° 5.

La distribution des résultats du traitement, essentiellement sous forme graphique, devait aussi être accélérée. Une étude pour un codage optimal des images a été entreprise et a déjà abouti à des résultats encourageants en France et aux Etats-Unis. En ce qui concerne la France, l'utilisation de fac-similé codé, permettant d'accroître la vitesse dans un rapport variant de deux à huit suivant le document envisagé, devrait devenir de pratique courante dans les cinq années à venir.

Nous reviendrons sur l'aspect traitement, mais avant d'en terminer avec la transmission, nous devons noter que l'augmentation des vitesses s'accompagne d'une restructuration du réseau lui-même. Onze centres, munis de calculateurs afin de réduire les délais de commutation des données, seront reliés entre eux, constituant une boucle mondiale. Chacun de ces centres assurera la concentration et la distribution des données dans sa zone de responsabilité.

Nous avons évoqué les différents types d'erreurs rencontrées. Pour ce qui concerne les erreurs instrumentales et les erreurs de mesure, le problème est hors de notre sujet. Il nous faut cependant insister sur un point particulier. L'augmentation de la vitesse de transmission doit permettre de faire remonter les demandes de rectifications à la source elle-même. Ceci présente un double intérêt : détecter rapidement la « dérive » d'un appareil dans le cas d'une erreur instrumentale ; éduquer l'observateur à qui l'on signale ses erreurs de mesure. En ce qui concerne les erreurs de manipulation, elles doivent être supprimées par l'extension de l'automatisation à l'ensemble du système. Enfin, les erreurs de transmission seront rendues négligeables par la mise en œuvre de dispositifs de détection et de correction.

La France et la Veille Météorologique Mondiale

La France a joué très tôt un rôle de premier plan dans le développement de l'automatisation en météorologie. Elle a été à la base de l'établissement du premier réseau de téléimprimeurs pour l'échange des données et du premier calculateur utilisé pour les transmissions météorologiques.

Dès 1952, les météorologistes français se sont intéressés à l'emploi de calculateurs pour le traitement des équations de l'hydrodynamique applicables au fluide atmosphérique. Après une première réalisation (1960), l'étude a été reprise en 1963 dans l'optique du traitement global de l'information météorologique. Par la suite, cette idée s'est parfaitement inscrite dans le cadre de la VMM pour laquelle Paris est un centre régional de télécommunications situé sur le circuit principal mondial. Ce centre est relié d'une part à dix pays étrangers avec lesquels il échange les données de base, d'autre part aux 150 stations du réseau national par l'intermédiaire de six centres régionaux.

Pour traiter les quelques cinq millions de caractères qui parviennent au centre, les circuits sont reliés à deux calculateurs 10 070 de la C.I.I. Munis chacun d'une mémoire centrale de 24 576 mots de 32 bits, ces calculateurs travaillent en temps réel et, afin de pouvoir assurer le contrôle, le stockage, puis la réémission des données, ils disposent chacun de mémoires auxiliaires à accès rapide d'une capacité de 6 millions de caractères et

de disques permettant de stocker 12 millions de caractères. Ils peuvent se relayer à chaque instant en cas d'incident. Un système d'exploitation spécialement écrit permet, en particulier, de relier au calculateur deux postes de supervision à partir desquels des météorologistes corrigent certaines erreurs.

Les calculateurs 10 070 sont reliés à deux calculateurs Control Data 6 400 qui assurent le contrôle des données et les traitements de prévisions. Ils sont aussi utilisés pour les besoins de la recherche. L'un d'eux dispose de 65 536 mots de 60 bits, l'autre de 131 072 ; des mémoires auxiliaires d'une capacité globale d'un demi-milliard de caractères permettent de stocker les données. Les tâches qui interviennent dans le processus de transformation des données brutes en prévision s'enchaînent automatiquement. Par l'intermédiaire de machines à écrire, des météorologistes peuvent intervenir pour corriger certains messages ou modifier le déroulement des travaux.

Le système d'exploitation du C.D.C. 6 400 a été en grande partie créé pour ce genre d'utilisation. C'est le fruit d'une collaboration des ingénieurs de la Météorologie Nationale, de la Société de Mathématiques Appliquées et de Control Data.

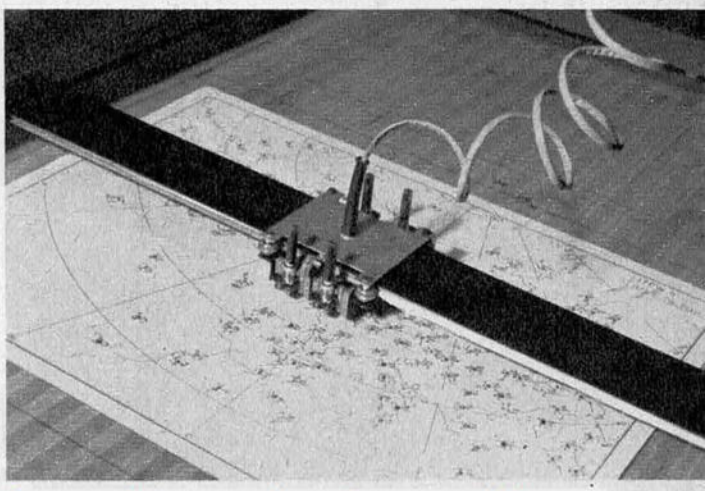
La sortie des résultats

Les prévisions donneront lieu à la production de quelques centaines de documents graphiques dont un certain nombre doit être distribué. Ces sorties nécessitent des moyens spéciaux adaptés aux différentes utilisations. Pour les utilisations locales, six traceurs Benson livrent aussi bien les cartes destinées à l'exploitation manuelle que celles résultant des prévisions.

Pour la mise au point, une sortie sur écran cathodique permet de visualiser les états intermédiaires de la prévision ou de vérifier les états finals avant de les distribuer.

Pour les utilisations à distance, les documents sont émis par radio-facsimilé, deux émissions permettent de distribuer en France et dans les pays étrangers les différentes sortes de prévision.

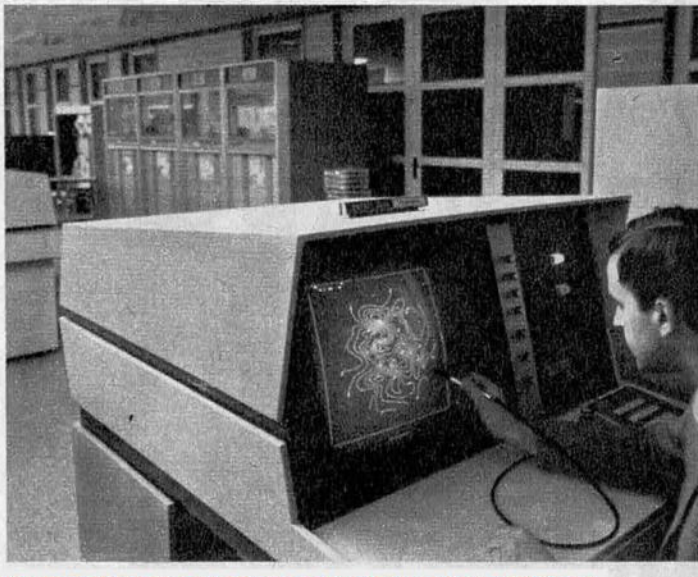
Les données sont collectées sur l'ensemble du globe toutes les heures, toutes les trois heures ou toutes les douze heures suivant le type d'observation. Ces observations doivent donc être traitées 24 heures sur 24. Le centre de traitement ne doit jamais s'interrompre quelles que soient les circonstances. C'est pourquoi des précautions particulières doivent être prises, telles que doublement des calculateurs, installation de centrales d'énergie suppléant



Des appareils traceurs de courbes sont utilisés pour la production de graphiques et de cartes, en particulier des cartes de prévision élaborées par un ordinateur.

les défaillances du réseau général, etc. Le fonctionnement et le développement d'un service météorologique repose sur la disponibilité de moyens puissants pour les mesures, les transmissions et les traitements. Pour en revenir à l'image utilisée au début de cet article, ce n'est que dans la mesure où l'entreprise Météorologie Nationale possède les moyens indispensables pour l'extraction des matières premières, leur acheminement, leur traitement, la distribution des produits finis, qu'elle peut remplir son rôle de fournisseur de l'information météorologique, facteur important de la productivité de toute l'économie nationale.

Jean LABROUSSE



La visualisation sur écran cathodique des prévisions élaborées par l'ordinateur permet des corrections par un opérateur, à l'aide d'un crayon à lumière.

PRÉVOIR LE TEMPS...

Les proverbes et les dictons relatifs au temps sont innombrables et montrent l'importance des intempéries parmi les soucis quotidiens de l'humanité.

Pour les civilisations primitives, la saison commande la bonne ou la mauvaise récolte, l'abondance ou la famine, et une part importante des efforts de l'humanité vers la civilisation est consacrée à se protéger des caprices de l'atmosphère.

Si le temps est l'une des préoccupations les plus constantes de l'homme, le prévoir est un art pratiqué depuis la plus haute antiquité. Un art que tout le monde pratique encore plus ou moins, recherchant dans le ciel des « signes » annonciateurs des changements de temps, consultant quelques instruments (thermomètre, baromètre, hygromètre primitifs) et même ses sensations (rhumatismes, cors aux pieds et autres).

Il est curieux de constater à quel point, dans l'ensemble, l'amateur prévisionniste utilise mal ce qu'il observe et interprète souvent à tort les données de ses instruments. Mais les hommes dont l'activité professionnelle ou la sécurité dépendent étroitement de l'atmosphère (marins, agriculteurs, bergers, montagnards, etc.), font généralement exception.

Une partie de la science acquise dans le passé lointain par ce genre d'observateurs se retrouve dans la sagesse populaire transmise par les proverbes ou les dictons. C'est le folklore de la météorologie. Quelques-uns d'entre eux traduisent des observations exactes, tel : « *Ciel pommelé et femme fardée ne sont pas de longue durée* ». D'autres sont valables dans une région mais se sont propagés ailleurs. Bien des dictons n'ont pas de sens, qu'il s'agisse d'une simple justification par la rime ou de référence au calendrier tel que « *Du dimanche matin la pluie bien souvent la semaine ennuie* », évidemment absurde puisque la division du temps en semaines est entièrement humaine et sans rapport avec l'atmosphère. La Lune intervient très souvent dans les règles populaires de prévision. C'est parfois justifié quand l'aspect de la Lune est simplement utilisé pour observer à la nuit des nuages autrement invisibles. Il n'est pas absurde *a priori* de supposer une influence de la Lune sur l'atmosphère, analogue à celle qu'elle a sur les marées. Elle existe, et on l'a mesurée. Elle est très faible et les moindres perturbations atmosphériques la masquent complètement. Les relations parfois énoncées entre le temps des premiers jours du premier quartier et le temps des quartiers suivants n'ont pas plus de sens que les relations avec les jours de la semaine.

Les débuts de la science météorologique

L'étude scientifique de l'atmosphère devrait commencer avec Aristote qui lui a donné son nom de Météorologie et qui l'a qualifiée de « Science sublime ». Mais le véritable début de la Météorologie en tant que science se situe vers le XVII^{e} siècle, comme pour la plupart des sciences de la nature. Des esprits curieux ont commencé à observer le ciel, comme d'autres les animaux, les plantes ou les roches. Peu à peu des instruments, thermomètre, baromètre, hygromètre, sont venus ajouter des éléments nouveaux à l'observation visuelle. Au début du XIX^{e} siècle, un ensemble de connaissances importantes était déjà rassemblé.

Cependant, si l'on avait classé les nuages, établi leur relation avec les précipitations, compris le mécanisme de formation du brouillard et de la rosée, observé une relation entre les intempéries et la pression atmosphérique, tenté d'interpréter les variations du vent, toutes ces connaissances se refusaient à s'organiser clairement. Nous savons maintenant que les phénomènes atmosphériques sont souvent de taille considérable à l'échelle humaine, et il était évidemment impossible, tant que l'observation restait locale, d'aller très loin.

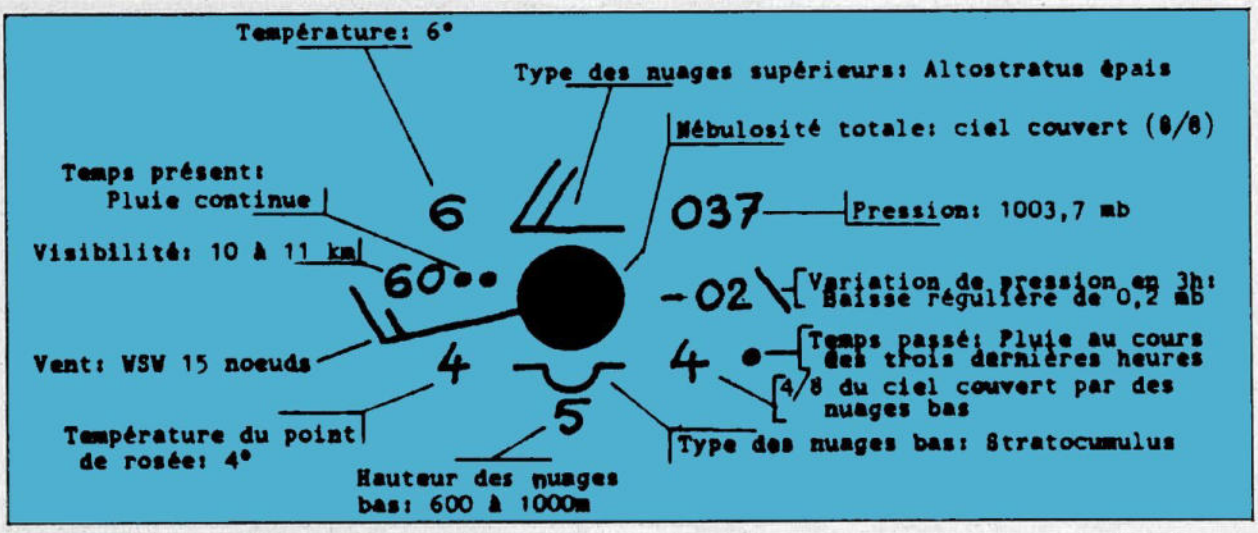
Il était pourtant possible, dès cette époque, d'échanger par la poste les observations faites en des points éloignés, et de tels échanges ont eu lieu. L'idée de comparer des séries d'observations de navires, consignées sur les livres de bord, a également été en partie mise en œuvre. Il faut cependant se rendre compte que l'on ne savait pas très bien quoi chercher.

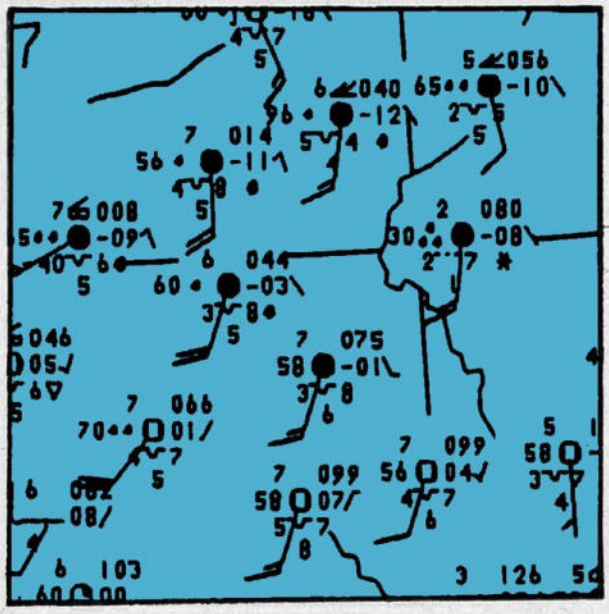
Il ne faudrait pas conclure de ce qui précède que des notions déjà très intéressantes sur l'atmosphère à très grande échelle n'étaient pas acquises au début du XIX^{e} siècle. Des phénomènes suffisamment constants, comme les alizés, ou suffisamment fréquents, comme la prédominance des vents d'Ouest, étaient déjà bien connus et même souvent expliqués. Mais la variabilité du temps local, liée au mouvement de phénomènes trop grands pour être vus dans leur ensemble, était difficile à comprendre. Des auteurs sérieux en arrivaient à la conclusion que le hasard jouait le rôle principal dans les fluctuations du temps local.

Nécessité d'un « macroscope »

Les naturalistes, tant qu'ils n'ont pas disposé du microscope, ont eu les plus grandes difficultés à comprendre nombre de phénomènes biologiques, qui ont été plus tard expliqués par

des êtres vivants ou des structures invisibles à l'œil nu.
Les êtres météorologiques sont, eux, trop grands pour qu'un observateur isolé puisse les saisir. Il fallait aux météorologistes un instrument rapetissant, un « macroscope », leur permettant de « voir » une étendue assez grande. Le macroscope des météorologistes s'appelle la « méthode synoptique », qui n'a pu se développer qu'après l'apparition de moyens rapides de communication vers 1850-1860.
Une Organisation Météorologique Internationale (O.M.I.), créée dès le début des échanges internationaux, a permis de les étendre progressivement à la Terre entière. A l'heure actuelle l'O.M.M. (Organisation Météorologique Mondiale, rattachée à l'O.N.U.) poursuit l'œuvre commencée il y plus d'un siècle par l'O. M.I.
Il ne suffit pas d'avoir collecté un grand nombre d'observations pour qu'il en résulte une image d'ensemble de l'état et de l'évolution de l'atmosphère. La création d'une image cohérente à partir de milliers d'observations est nommée *analyse*.
Voyons un peu dans le détail la suite des opérations qui conduisent à la prévision en nous plaçant vers les années 1950, qui marquent un tournant dans les méthodes de prévision en météorologie.
Le météorologiste parisien, par exemple, qui a la tâche de fournir une idée d'ensemble de la situation atmosphérique dans le domaine qui l'intéresse, serait bien embarrassé s'il devait consulter directement les messages codés de quelques centaines de stations. Il est nécessaire que les divers éléments de chaque observation soient reportés sur une carte, à la position géographique de la station. Ils y sont « pointés » sous la forme de chiffres ou de signes symboliques. Les cartes obtenues sont les cartes du temps. Les météorologistes français les appellent souvent *cartes norvégiennes*, rappelant ainsi que ce sont les météorologistes





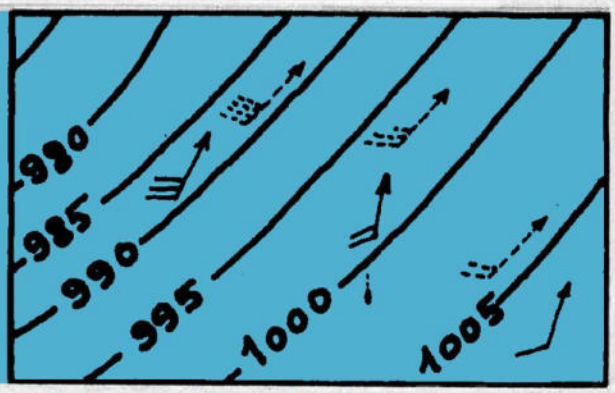
Une observation « pointée ». Elle est habituellement transcrite sous une forme entièrement codée pour la transmission à distance.

A gauche, un fragment d'une carte pointée automatiquement après décodage des informations par un calculateur électronique.

norvégiens qui ont, plus que d'autres, porté cette méthode de travail à son degré actuel.

Ce que dégage l'analyse

Les méthodes d'analyse ne sont pas fermement établies et des variantes sont possibles, mais l'une des plus fréquentes est de commencer par déterminer le mouvement à grande échelle.
Le vent est pointé sur les cartes, mais il est



Le vent et la pression : les traits pleins correspondent aux lignes isobares ; les flèches représentent la direction du vent (flèche pleine, au voisinage du sol ; flèche tiretée, en atmosphère libre). La vitesse du vent est indiquée par les barbules (1 grande barbule 10 nœuds, 1 petite barbule 5 nœuds).

difficile de former une vue d'ensemble du mouvement de l'atmosphère à partir des vents de surface qui sont faussés par le relief environnant ou les effets des brises locales. Il est préférable de procéder indirectement en utilisant la pression atmosphérique.

Entre la pression et le vent existe une relation relativement simple : en atmosphère libre, le vent circule à pression constante en laissant (dans l'hémisphère Nord) les hautes pressions sur sa droite (sur sa gauche dans l'hémisphère Sud). Au voisinage du sol, le frottement sur la surface terrestre dévie le vent vers les basses pressions.

Un « analyste » traçant une carte d'isobares trace ses lignes en suivant les valeurs de la pression indiquée pour les stations, mais il se guide également sur le vent. Inversement, la carte terminée, les lignes qu'il vient de tracer représentent assez bien le mouvement de l'air. L'image de l'atmosphère que l'on obtient ainsi est encore très succincte. On y distingue comme éléments principaux des zones de hautes pressions, les « anticyclones », et des régions de basse pression ou « dépressions » (1). Le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones, en sens inverse autour des dépressions. L'examen de cartes de pression successives, quand elles ne sont pas trop espacées dans le temps, montre que la plupart de ces figures sont identifiables pendant plusieurs jours, mais qu'elles se déforment et se déplacent, le plus souvent d'Ouest en Est, mais c'est très loin d'être une règle.

Cette constatation déjà ancienne a été une première base de prévision. Si l'on peut suivre les dépressions, par exemple, on doit pouvoir, du mouvement passé, déduire le mouvement futur et annoncer le passage d'une dépression en un lien donné. Sachant par ailleurs que les basses pressions sont généralement accompagnées de mauvais temps, on dispose d'une méthode de prévision.

(1) Le terme « cyclone », pour « dépression », n'est plus guère utilisé dans le language technique, sauf pour les cyclones tropicaux. C'est en partie parce qu'il a dérivé dans la langue commune vers le sens de vent violent. Anticyclone est resté.

La notion de « masse d'air »

A la fin du siècle dernier, les météorologistes avaient déjà remarqué que, aux latitudes moyennes, se succédaient en un même lieu des états atmosphériques semblant appartenir à deux « courants atmosphériques » distincts, l'un froid, l'autre chaud (qu'ils désignaient sous le nom de « courant polaire » et de « courant tropical »). Ils avaient également découvert que les tempêtes et les tourbillons cycloniques étaient particulièrement fréquents au voisinage des limites de ces courants.

Ces notions se sont conservées dans la météorologie moderne en se précisant par la notion de « masse d'air ». Cette notion résulte, par exemple, de l'observation selon laquelle la température ne varie pas graduellement d'un point à l'autre mais semble rester constante ou presque sur de vastes étendues, puis change de valeur assez brusquement entre des points relativement voisins. En schématisant, on peut dire que l'atmosphère est constituée de volumes distincts, de propriétés différentes, les « masses d'air », entre lesquelles existent des discontinuités que l'on a dénommées « fronts ».

Les masses d'air se forment, en principe, lorsque, dans une région assez homogène (océans, déserts, plaines couvertes de neige) où les vents sont faibles, une partie de l'atmosphère stationne assez longtemps pour qu'elle se mette en équilibre avec les conditions locales.

Lorsque le mouvement reprend, les parties de l'atmosphère qui étaient voisines dans la région de formation ont des trajectoires voisines et, traversant ensemble les diverses régions où elles sont entraînées, subissent les mêmes transformations. Ces transformations se traduisent par un temps particulier : éclaircies et averses, par exemple, ou brouillard.

C'est l'organisation du mouvement qui fait que, dans certaines conditions, des parties de l'atmosphère d'origines et de trajectoires très différentes sont amenées au voisinage l'une de l'autre. Il y a création d'une zone de transition étroite, d'un front. A l'intérieur d'une masse d'air donnée, loin de ses limites, le temps est

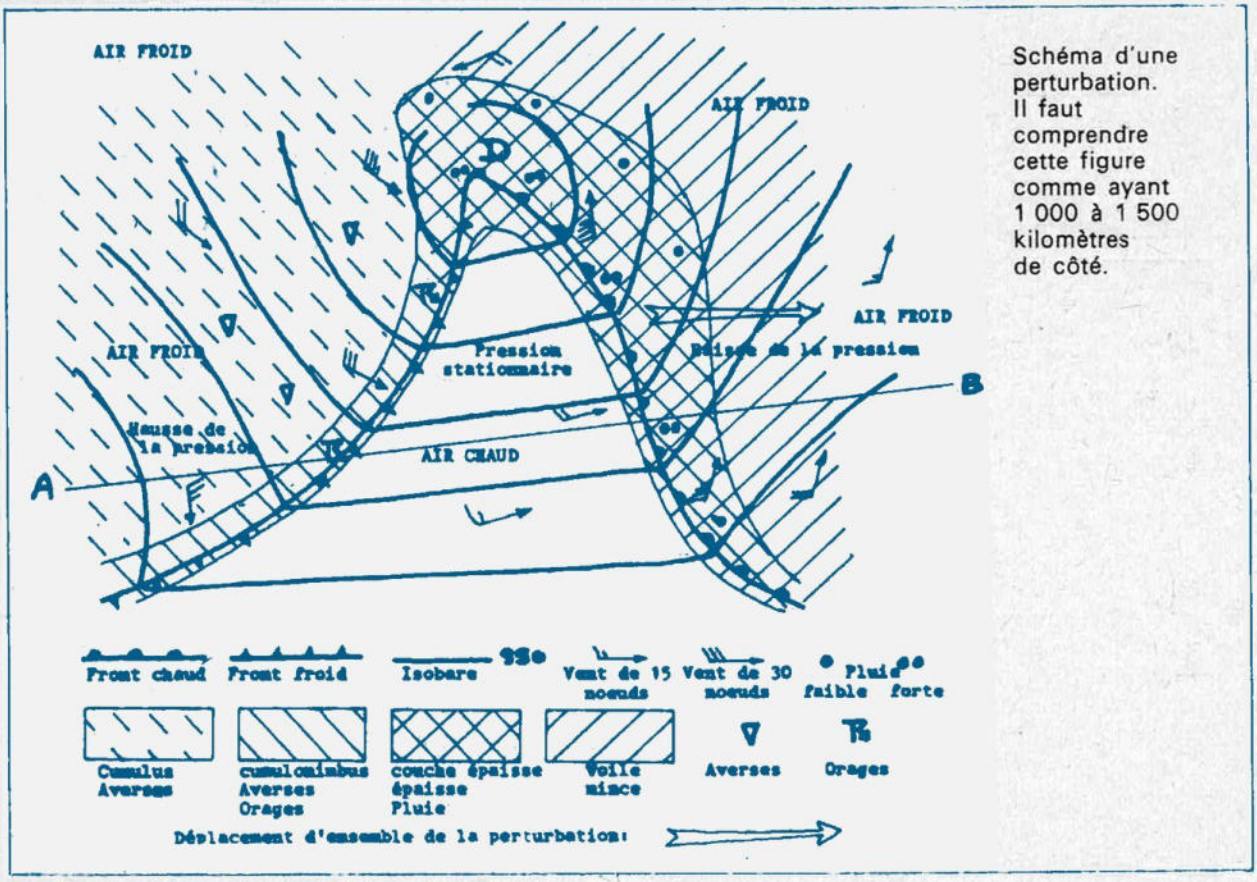


Schéma d'une perturbation. Il faut comprendre cette figure comme ayant 1 000 à 1 500 kilomètres de côté.

à peu près le même partout, à des phénomènes locaux près. De plus, du jour au lendemain, le temps caractéristique d'une masse d'air évolue assez peu pour qu'elle cesse d'être reconnaissable.

Des masses d'air en conflit

Les événements atmosphériques qui se produisent le long des fronts sont très particuliers et les intempéries importantes sont souvent des phénomènes frontaux.

Leur forme dépend du sens de déplacement du front :

— si le front se déplace de telle sorte que l'air le plus froid avance, l'air plus chaud, plus léger, qu'il chasse devant lui est en partie soulevé et donne naissance à de fortes averses ou des orages. C'est un « front froid ».

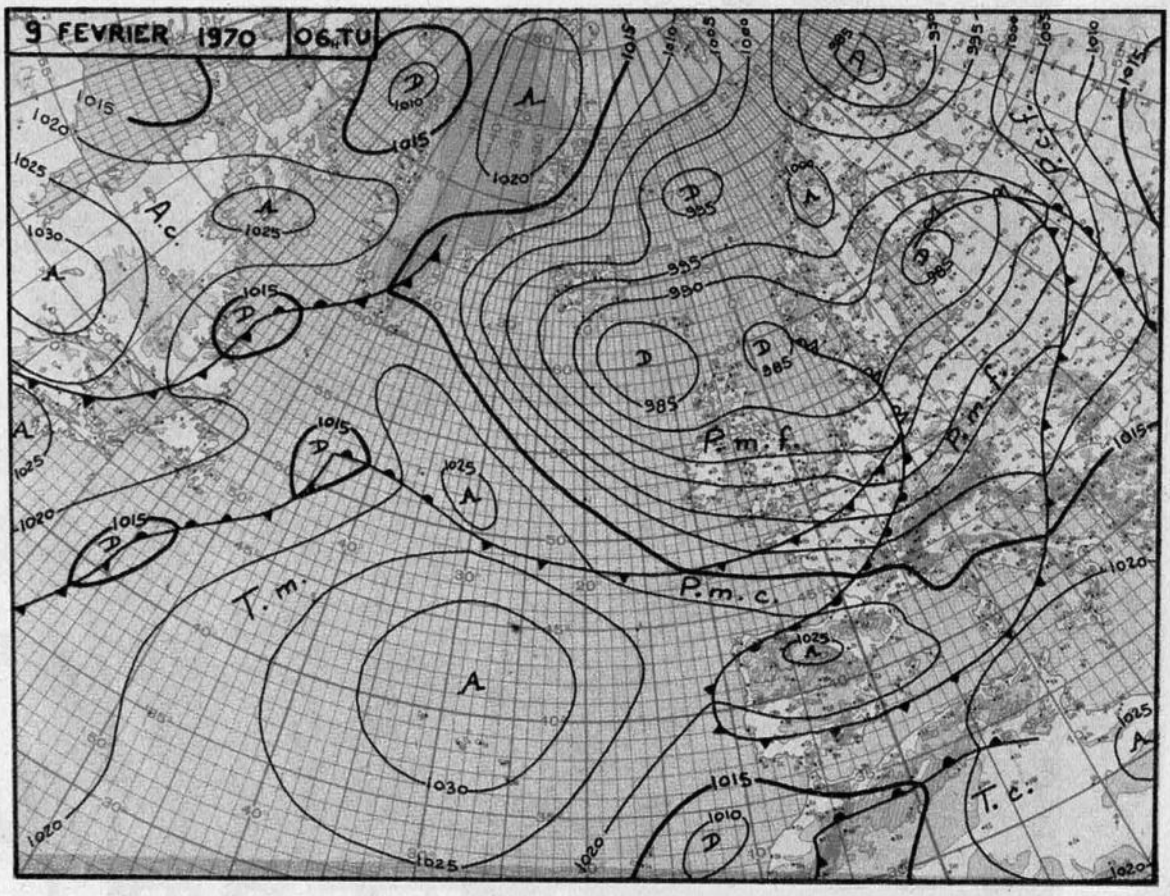
— si au contraire l'air froid recule, l'air chaud qui le chasse, plus léger, aura tendance à s'élever le long du plan incliné que forme la limite. Il se produit de vastes nappes nuageuses accompagnées de pluie, ou de neige s'il fait assez froid. C'est un « front chaud ».

Le passage d'un front sur une localité se traduit par certains phénomènes. Pour un front chaud, tout est progressif. A son approche, le baromètre baisse, le ciel se couvre progressivement de nuages en nappes (d'abord ténues, puis de plus en plus épaisses), la pluie tombe, d'abord fine, puis de plus en plus intense. Le passage du front est marqué par l'éclaircissement du ciel, la hausse de la température, l'arrêt de la baisse du baromètre. Le vent faiblit et tourne brusquement dans le sens des aiguilles d'une montre. L'atmosphère devient brumeuse.

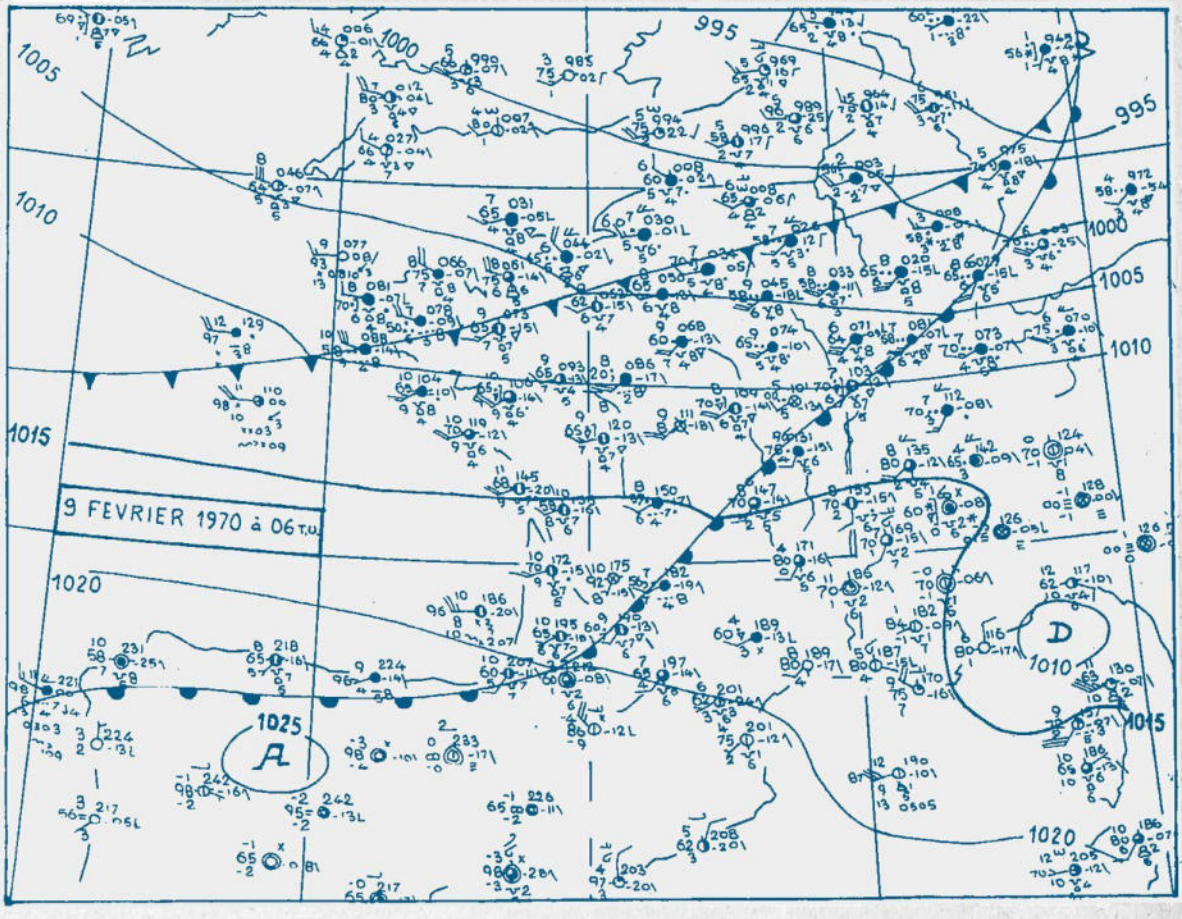
Pour un front froid, les phénomènes sont brusques : son approche n'est pas très marquée, sinon parfois, et peu de temps à l'avance, par des nuages caractéristiques, cumulus très importants ou nuages orageux formant une barrière parfois impressionnante ; le baromètre varie peu ou baisse légèrement ; le vent est modéré. Juste avant ou au passage du front, le vent se renforce brusquement en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre ; l'orage éclate ou l'averse se déclenche soudain ; le baromètre monte brusquement, souvent au point de dessiner sur le diagramme des enregistreurs un « crochet » caractéristique ; la température s'abaisse, parfois de plusieurs degrés.

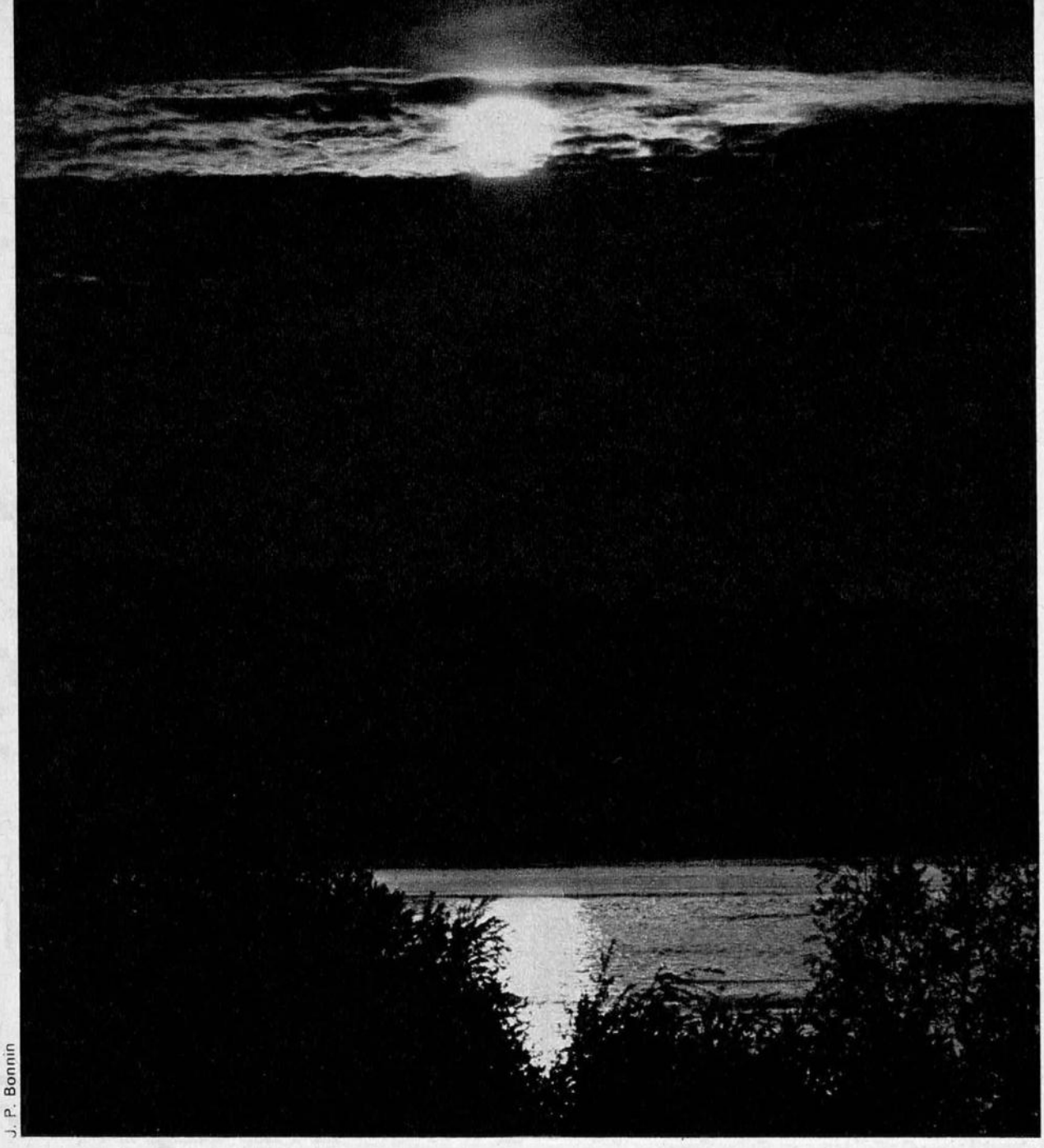
Le météorologiste ne dispose pas, lorsqu'il détermine les fronts sur sa carte, d'historique continu des événements pour chacune des stations qui y sont pointées. Il faut donc qu'il procède par comparaison de stations voisines. Pour cela il repérera les observations, peu nombreuses, qui indiquent par elles-mêmes qu'un

Des masses d'air en conflit sur l'Europe et l'Atlantique : une vaste zone dépressionnaire occupe le Nord de l'Europe ; un grand anticyclone s'étend, au sud, sur l'Océan. Le mouvement de l'air autour de la zone dépressionnaire amène sur l'Europe de l'air polaire maritime. La limite entre cet air froid et l'air chaud plus au Sud ondule et forme des perturbations dont l'une traverse la France.



Une perturbation sur la France. On peut noter le changement de direction de part et d'autre des fronts. La pression baisse presque partout, mais plus fort à l'avant du front chaud. La situation représentée ici s'intègre dans la situation générale représentée par la carte en haut de page.





J. P. Bonnin

front est en train de passer à la station ou qu'il vient de passer, ou qu'il va passer. Il recherchera des discontinuités de vent, de température, d'humidité entre des stations. Une des grandeurs les plus intéressantes à considérer est la variation de pression dans les trois heures précédentes.

L'analyse des fronts

Le tracé des fronts est un travail difficile, car il faut tenir compte d'un grand nombre d'éléments. Les phénomènes sont plus complexes en réalité que les indications schématiques données ici ne le laisseraient supposer.

Lorsque l'analyse « frontologique » est terminée, l'image obtenue, sur laquelle figurent également les isobares, comporte un certain nombre de fronts, dont les caractéristiques sont représentées par des symboles appropriés, séparant des masses d'air.

Une configuration très fréquente, bien mise en évidence par les météorologistes norvégiens il y a cinquante ans, est souvent la cause des intempéries dans nos régions.

Lorsque deux masses d'air sont en contact sur une très grande longueur, il arrive que le front qui les sépare soit instable du fait du glissement des deux masses d'air l'une par rapport à l'autre ; des ondulations se forment qui se propagent sur la limite des deux masses d'air en s'amplifiant rapidement.

Lorsque l'on se place en un lieu donné, on voit

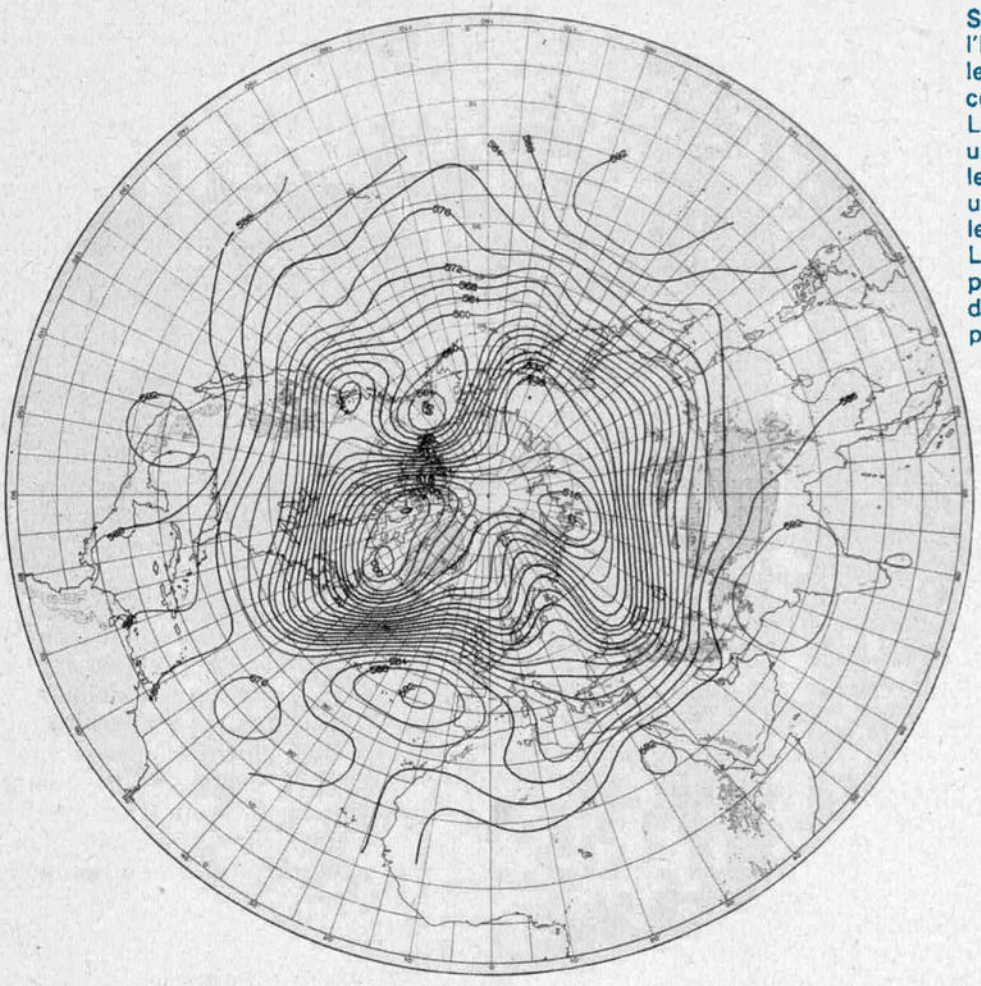
donc se présenter un front chaud, avec ses caractéristiques, suivi un peu plus tard d'un front froid. On observe des variations du vent et de la pression qui sont depuis longtemps associées aux intempéries les plus habituelles : baisse du baromètre, rotation du vent en sens inverse des aiguilles d'une montre, précédant le voile nuageux du front chaud et la pluie. Après le passage du front chaud et la hausse de température, le front froid arrive, avec baisse de température, rotation brusque du vent dans le sens des aiguilles d'une montre et hausse de la pression.
Sur la carte, la répartition de la pression présente souvent une dépression autour de l'ondulation, mobile avec elle. Moins fréquemment, un maximum de pression se dessine à l'arrière de la vague. L'ensemble de ces figures se déplace dans le même sens que l'ondulation. Dès que l'on eut identifié ces dépressions mobiles comme cause des perturbations de pressions, le nom de perturbation fut associé à ces dépressions et aux intempéries qui les accompagnent.

La conquête de la troisième dimension

L'exploration des couches supérieures de l'atmosphère est déjà ancienne. Des observations sur les sommets des montagnes, à bord de ballons libres, puis par des appareils enregistreurs entraînés par des ballonnets et récupérés après leur chute, avaient déjà permis de se faire une idée assez précise de l'atmosphère en altitude. Toutefois les mesures effectuées n'étaient pas immédiatement disponibles et par conséquent pas directement utilisables pour la prévision. Des renseignements moins précis sur le vent en altitude ont été cependant obtenus par l'observation du mouvement des nuages ou celle, au théodolite, de la trajectoire de ballonnets. Disponibles en temps utile, ces renseignements étaient cependant insuffisants en nombre et en qualité pour fournir une image précise de l'atmosphère au-dessus de 2 à 3 km.
Le problème a été en partie résolu par la création de la radiosonde qui transmet au sol par radio les valeurs de la pression, de la température et de l'humidité : le vent est déterminé en suivant des ballons (celui de la radiosonde, par exemple) au radar et en calculant leur déplacement horizontal.
Quand les radiosondages ont été disponibles en nombre suffisant, au cours de la décennie 1930-1940, les météorologistes ont d'abord tenté d'établir, pour certaines altitudes bien déterminées (1 000 m, 2 000 m, etc), des cartes d'isobares analogues à celles que l'on traçait en surface. On s'est cependant rapidement aperçu qu'il était plus avantageux d'employer une autre représentation : les « surfaces isobares ».
L'idée de « surface isobare » généralise à trois dimensions la notion d'isobare. La « surface isobare 700 mb », par exemple, passe par tous les points de l'atmosphère où la pression est égale à 700 mb. C'est une surface continue qui sépare la partie de l'atmosphère où la pression est supérieure à 700 mb (en dessous de la surface 700 mb) de celle ou la pression est inférieure à 700 mb (au-dessus).
Il suffit de donner, comme le font les géographes, les « lignes de niveau » de cette surface pour la définir complètement, et de répéter cette opération pour diverses surfaces pour définir la répartition de la pression en altitude aussi bien que par des cartes d'isobares à niveau constant.
Ces cartes montrent, comme les cartes d'isobares, le mouvement de l'atmosphère car la liaison qui existe entre le vent et les lignes de niveau des surfaces isobares est analogue à celle qui le lie aux isobares pour une altitude fixe. Ceci s'énonce simplement en disant que, sur une surface isobare, le vent souffle le long des lignes de niveau en laissant les hauteurs sur sa droite (il faudra dire sa gauche dans l'hémisphère Sud) ; sa force est proportionnelle à la pente de la surface.

Un effet de « zoom »

Le simple bon sens nous indique que plus l'échéance est courte, plus il faut entrer dans le détail. Le trajet parcouru étant toujours en proportion du temps écoulé, il faut, pour une prévision à plus longue échéance, examiner une zone plus étendue afin de « voir venir » les phénomènes de grande taille qui nous intéressent.
Ainsi, pour des prévisions à quelques heures d'échéance, un domaine géographique couvrant la France et les pays limitrophes sera suffisant. Par contre, pour plus de vingt-quatre heures, il faudra utiliser des cartes sur lesquelles figurent la majeure partie de l'Atlantique, toute l'Europe, la Méditerranée, l'Afrique du Nord, et ainsi de suite.
Ces diverses images restent encore imparfaites. Pour les cartes détaillées, la densité des stations est encore insuffisante pour atteindre à coup sûr tous les phénomènes importants. Ainsi les orages violents, les trombes passent souvent entre les stations d'observation de surface distantes d'environ 70 km. Si l'on voulait ramener l'intervalle des stations à une vingtaine de kilomètres pour qu'aucun orage de quelque importance ne passe inaperçu, il faudrait décupler le nombre de sta-



Surface 500 mb sur l'hémisphère Nord : les lignes de niveau sont cotées en décamètres. La surface présente un creux dans les régions polaires, un bord élevé dans les régions tropicales. Le vent est d'autant plus fort que les lignes de niveau sont plus serrées.

En page de droite, un détail de la carte 500 mb. Les traits pleins correspondent toujours aux lignes de niveau, les lignes tiretées aux isothermes (en degrés C). L'isotherme — 20° fait un crochet sur le Nord de la France, correspondant à la perturbation représentée sur les cartes p. 79.

tions, ce qui serait coûteux et d'ailleurs inutile, car la durée de phénomènes de ce genre est de l'ordre de l'heure, ce qui est bien trop court pour que l'on puisse exploiter les renseignements obtenus (1).

Dans une certaine mesure les satellites météorologiques fournissent un complément d'information, mais leurs observations ne sont, pour le moment, pas assez fréquentes pour qu'un événement important, tel que la naissance d'une perturbation, puisse à coup sûr être détecté à temps.

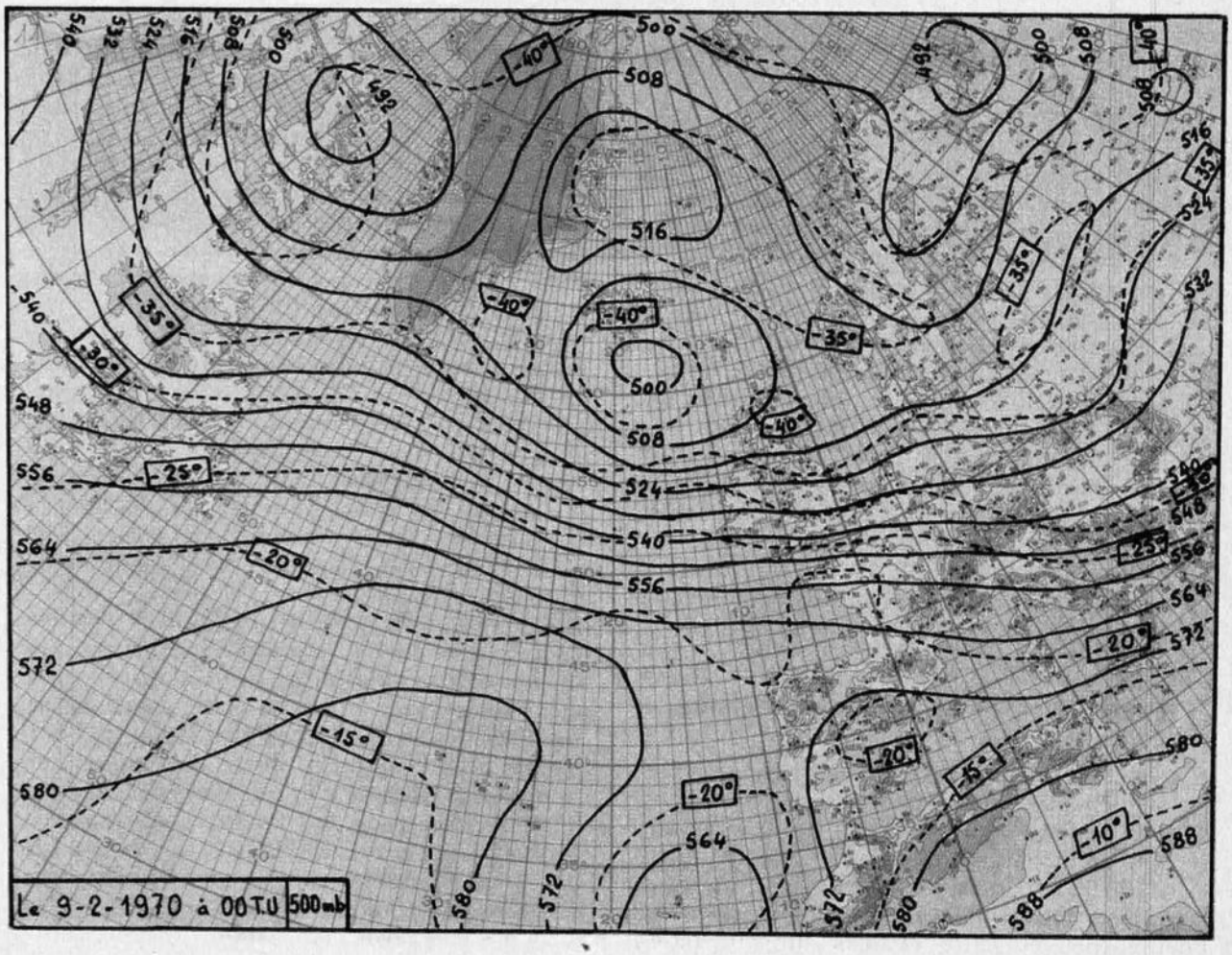
Les bases de la prévision

Disposant d'une image aussi précise que possible de la situation atmosphérique quelques heures plus tôt, le météorologiste, qui peut également examiner l'évolution au cours des jours et des heures précédentes, doit extrapoler cette évolution et décrire les phénomènes intéressant la journée ou les jours suivants.

Dans les premiers temps de la météorologie synoptique, après la découverte du caractère migrateur des cyclones, l'idée de prolonger simplement le mouvement d'un phénomène ou d'un groupe de phénomènes était toute naturelle. C'est resté, jusqu'à ces dernières années, la méthode de base de la prévision synoptique. La trajectoire des dépressions, des anticyclones, des perturbations, le déplacement des fronts, des masses d'air étaient repérés, puis prolongés, les positions futures évaluées compte tenu des déplacements passés. Mais les trajectoires ne sont pas rectilignes, les déplacements sont accélérés ou ralentis, les dépressions se creusent ou se comblent, les fronts se renforcent ou s'atténuent. Les météorologistes ont bien entendu tenté d'extrapoler ces variations, obtenant une amélioration certaine. Par ailleurs on a mis en évidence que certaines configurations de fronts, de masses d'air, de dépressions, de courants conduisaient à l'apparition de nouvelles évolutions, qu'il devenait possible de prévoir.

Lorsque le développement des réseaux de radiosondage a permis de disposer quotidienne-

(1) On peut, au moins en partie, résoudre le problème par l'utilisation de radars météorologiques qui donnent certains éléments sur une étendue bien plus grande que l'observation directe. Un radar peut couvrir un domaine assez étendu pour assurer la protection d'un point sensible, tel qu'un aérodrome, avec des délais suffisants. Le radar, cependant, ne fournit que les zones de précipitations : les nuages, le vent lui sont inaccessibles.



ment d'une représentation à trois dimensions avec des cartes de surfaces isobares, on s'est rapidement essayé à raisonner sur l'épaisseur totale de l'atmosphère.

Il est apparu que le mouvement général de l'air était plus facile à suivre sur les cartes représentant les surfaces situées vers le milieu de l'atmosphère. Il y a la moitié, ou à peu près, de la masse atmosphérique totale au-dessus et au-dessous de la surface isobare 500 mb, et le vent tel qu'il est représenté sur la carte est voisin du vent moyen sur une verticale.

L'examen de cartes de la surface 500 mb pour l'hémisphère Nord montre une configuration du mouvement sensiblement différente de celle que l'on voit sur les cartes de surface. On trouve moins de dépressions ou d'anticyclones, le vent s'organise, autour d'une dépression voisine du pôle, en un vaste courant d'Ouest dont les méandres se sont révélées plus significatifs pour l'évolution atmosphérique que ne l'étaient les dépressions ou les anticyclones des cartes de surface.

Lorsque l'on entre plus dans le détail, en examinant, par exemple une carte à 500 mb où figurent également les isothermes représentant la température et couvrant l'Europe, l'Atlantique et l'Amérique du Nord, on voit se dessiner des configurations de vent et de température qui permettent d'énoncer des règles de prévision concernant leur évolution. Les méandres du courant d'Ouest, par exemple, se déplacent généralement vers l'Est et sont accompagnés de poussées d'air chaud vers le Nord, ou d'avancées d'air froid vers le Sud, marquées par les isothermes.

Vers des prévisions locales

Il reste cependant que les phénomènes qui intéressent les activités humaines (sauf l'aviation) sont en général localisés dans les couches situées au-dessous de 500 mb et qu'il faut encore faire une prévision de surface, mieux guidée, il est vrai, par une bonne prévision d'altitude.

S'étant fait une idée de l'évolution générale de l'atmosphère pour la zone géographique dont il a la responsabilité, le prévisionniste doit encore, pour les utilisateurs de ses prévisions, décrire toutes les conséquences de cette évolution.

Le problème n'est pas simple. En effet, les

conditions locales font qu'un même phénomène à grande échelle se traduit différemment suivant la région, la nature du sol, son relief. Suivant les heures de la journée et de la nuit, les phénomènes associés aux masses d'air et aux fronts subissent des modifications que l'on désigne habituellement par les termes « variation diurne », parfois si importantes qu'elles constituent l'essentiel de la prévision.
On a donc été amené à confier à des spécialistes l'adaptation à des régions moins vastes. Ces prévisionnistes régionaux connaissent le territoire dont ils ont la responsabilité et peuvent mieux tenir compte des circonstances locales. Ils ne peuvent cependant pas non plus aller aussi loin dans le détail qu'on pourrait le souhaiter. Des accidents de terrain tels qu'un petit lac, un fond marécageux, une forêt, une falaise, ont une influence significative sur le temps. Il est impossible de les prendre tous en considération. Le problème devient encore plus complexe en pays de montagne.

Incertitudes et erreurs de prévision

A très courte échéance, quelques heures, l'évolution générale, liée principalement au déplacement des masses d'air et des fronts, comporte peu de variations de vitesses, de déformations. Elle est relativement facile à prévoir. Les effets locaux, la variation en fonction de l'heure, peuvent être évalués sur des bases solides. Il n'en est plus de même à partir d'une échéance de vingt-quatre heures.
La première des règles de prévision que l'on puisse énoncer est la prévision de persistance : « Il fera demain le même temps qu'aujourd'hui ». Elle est vérifiée dans les deux tiers des cas pourvu qu'on n'aille pas trop dans le détail. S'il a plu aujourd'hui, il pleuvra demain dans deux cas sur trois, mais est-ce le matin ou l'après-midi ?
On estime que la méthode synoptique conduit à une prévision correcte dans les trois quarts des cas. Les esprits chagrins diront que deux siècles de recherches pour améliorer le score de 9 % est peu. Les météorologistes préfèrent penser que réduire la marge d'incertitude de 33 à 25 % n'est déjà pas si mal. Il n'est pas inutile de discuter un peu en détail comment se produit et quelle est la nature d'une « erreur de prévision ».
Une première forme d'erreur consiste à mal évaluer le déplacement et l'évolution générale. Supposons, par exemple, qu'une dépression mobile à laquelle est associée une perturbation active se dirige vers la France, venant de l'Ouest, et que sa vitesse de déplacement dans le passé ait été de 1 200 km par 24 heures. Les prévisionnistes travaillant en fin de matinée disposent des analyses de la situation à 7 heures du matin. Ils doivent extrapoler le mouvement de la dépression et de la perturbation jusqu'à minuit le lendemain, soit à plus de 40 heures ; le déplacement à prévoir est de l'ordre de 2 000 km ; une erreur de 5 % sur l'évaluation de la vitesse ou de la direction correspond à 100 km.
Il ne s'agit encore là que d'erreurs d'appréciations dans les vitesses, les courbures de trajectoires, l'évolution, qui se traduisent au pire par des positions ou des horaires d'événements erronés. Mais il arrive que les masses d'air, les fronts, les dépressions que l'on suit soient rejetés, déformés par une évolution imprévue. Il n'est pas nécessaire de faire appel à des causes mystérieuses pour expliquer de telles évolutions. La mécanique des fluides abonde en exemples de ce type de phénomènes, liés à l'instabilité des mouvements des gaz ou des liquides.
En supposant la prévision de l'état et du mouvement général de l'atmosphère correcte dans son ensemble, une autre cause d'erreur intervient dans l'adaptation de cette prévision aux conditions locales, dans l'évaluation de l'importance de l'évolution diurne. La compréhension de la plupart des phénomènes liés aux facteurs locaux ou à l'évolution diurne n'est généralement pas très difficile ; elle fait partie de l'instruction élémentaire des météorologistes. Ces phénomènes restent cependant très difficiles à prévoir en temps utile en raison de leur complexité et il faut encore, dans ce domaine, se reposer sur l'expérience professionnelle des prévisionnistes.

La révolution numérique

Les méthodes d'appréciation de l'exactitude des prévisions, qui donnaient 75 % de réussite aux prévisions établies par les méthodes synoptiques pour 24 heures, donnent aujourd'hui un taux de succès voisin de 85 %. Ce progrès important est dû au développement du calcul électronique.
Il est à peine exagéré de dire que la météorologie est une science sans mystère. Très peu des phénomènes observés sont difficiles à expliquer qualitativement par les lois connues de la mécanique et de la physique traditionnelle. Mais il ne suffit pas d'avoir établi les équations d'un problème pour en avoir la solution pratique et l'on rencontre ici deux difficultés de taille. L'une résulte de la mécanique des fluides elle-même. Dans tous les domaines où elle est en cause, qu'il s'agisse de tuyaux, de canaux, d'ailes d'avion, on a longtemps préféré faire des expériences et des mesures plutôt que d'utiliser les équations. La

difficulté est toujours la même, l'instabilité du mouvement, telle que, à le suivre, on le voit se perdre dans une complexité effroyable de tourbillons, d'oscillations de faibles dimensions. On exprime cette dégénérescence du mouvement par le mot « turbulence », terme qui montre que l'on a renoncé à suivre le détail pour ne plus s'intéresser qu'à l'ensemble.

L'autre difficulté tient au fait que l'on ne connaît l'état et le mouvement de l'atmosphère que par des observations en un certain nombre de points et d'instants espacés. Du fait du caractère toujours plus ou moins « turbulent » des mouvements atmosphériques, les mesures effectuées en un point ne sont qu'un échantillon des valeurs en ce point. Effectuer suffisamment d'observations et de mesures pour définir complètement l'état de l'atmosphère est tout à fait impossible. Si l'on ajoute à cela le fait que la résolution des équations décrivant le mouvement à partir d'un état initial donné est un problème mathématique non résolu, on comprendra que la prévision quantitative du temps ait pu, il y a encore ving-cinq ans, sembler irréalisable.

L'apparition de moyens de calcul numérique puissants et rapides a, dans une certaine mesure, permis de sortir de l'impasse.

Les données d'observation qui parviennent aux centres de prévision sous forme chiffrée sont des signaux télégraphiques que les calculateurs peuvent prendre en compte, après un décodage convenable réalisé automatiquement. Ces données entrent dans un cycle complexe de calculs d'ajustement, appelés à juste titre « analyse », pour aboutir finalement à un tableau de nombres qui est, lui aussi, une image de l'atmosphère. Une image encore très incomplète, car elle ne comporte que les grandeurs mesurables (pression, température, humidité, vent) en un nombre limité de points. Le calcul de prévision proprement dit applique les mêmes lois, les mêmes équations que celles que l'on a longtemps utilisées pour justifier les raisonnements restés qualitatifs faute du temps nécessaire pour faire les calculs. La prévision numérique n'est nouvelle que par les moyens et les techniques employées.

La prévision numérique a ses limites

L'une des limitations des méthodes numériques réside dans le manque de détails de la prévision élaborée. Les premiers calculateurs utilisés pour les prévisions numériques, il y a 20 ans, étaient deux ou trois cents fois plus lents que ceux que l'on utilise actuellement, leurs capacités de mémoire plus de cent fois plus faibles. Les modèles atmosphériques ont, depuis, profité des progrès des machines à traiter l'information, et sont devenus plus complets. Les résultats se sont notablement améliorés. Mais il ne s'ensuit pas que l'emploi de calculateurs de plus en plus puissants puisse augmenter indéfiniment l'exactitude des prévisions.

Le calcul ne peut donner une image correcte de l'évolution de l'atmosphère que si les données initiales sont correctes. Cette condition n'est jamais tout à fait réalisée. Les observations utilisées sont imparfaites et souvent insuffisantes en nombre.

La prévision numérique ne fournit encore qu'une prévision du mouvement général de l'atmosphère. Elle ne prend pas en compte les masses d'air et les fronts. Les phénomènes qui leur sont associés doivent être mis en évidence par les méthodes classiques que nous avons décrites, puis déplacés en tenant compte de la prévision numérique du mouvement. L'état initial de l'atmosphère, qui sert de point de départ aux calculs de prévision, n'est pas connu de manière parfaite, en raison du nombre insuffisant d'observations. De plus, les « modèles atmosphériques » ne peuvent pas prendre en compte les mouvements à petite échelle. Il faudrait, à la limite, aller jusqu'aux molécules. Ce n'est pas le mouvement réel de l'atmosphère que l'on calcule, mais celui d'une atmosphère fictive qui ne comporte pas ces petits mouvements ou, au mieux, simule leur effet global.

Au-delà de deux ou trois jours...

La qualité des prévisions décroît avec le temps, et cela d'autant plus vite que la situation était mal connue au départ (on ne peut pas la connaître parfaitement) et que le calcul est imparfait (il est impossible qu'il soit infiniment détaillé). Le coût de la prévision croît évidemment avec l'échéance, tandis que sa qualité décroît. La limite actuellement retenue dans la pratique est de l'ordre de trois jours, cinq au maximum, pour les méthodes numériques.

Que peut-on raisonnablement dire au-delà de trois jours ?

Tout d'abord, on peut décrire le « temps de saison ». Encore faut-il le connaître. Tout le monde pense qu'il fait plus froid en hiver qu'en été, plus chaud sur les bords de la Méditerranée qu'en Islande. Mais il arrive que l'on observe 12° en Islande pendant qu'il fait — 6° à Alger. Les températures de certaines périodes de juillet peuvent être plus basses que celles de périodes chaudes de février. La définition du climat peut rendre des services lorsqu'il s'agit de planifier le futur puisqu'elle permet souvent de décider de la possibilité ou de la rentabilité probable d'une opération. Ainsi, s'il est important de savoir quelle sera la

température pour un certain jour de l'été prochain à 15 heures, l'information climatologique pourra, par exemple, indiquer 25°, mais si elle est complète indiquera en même temps que des températures inférieures à 20° ou supérieures à 30° risquent de se produire dans 30 % des cas. C'est une information connue *a priori*, indépendante du moment où elle est fournie.

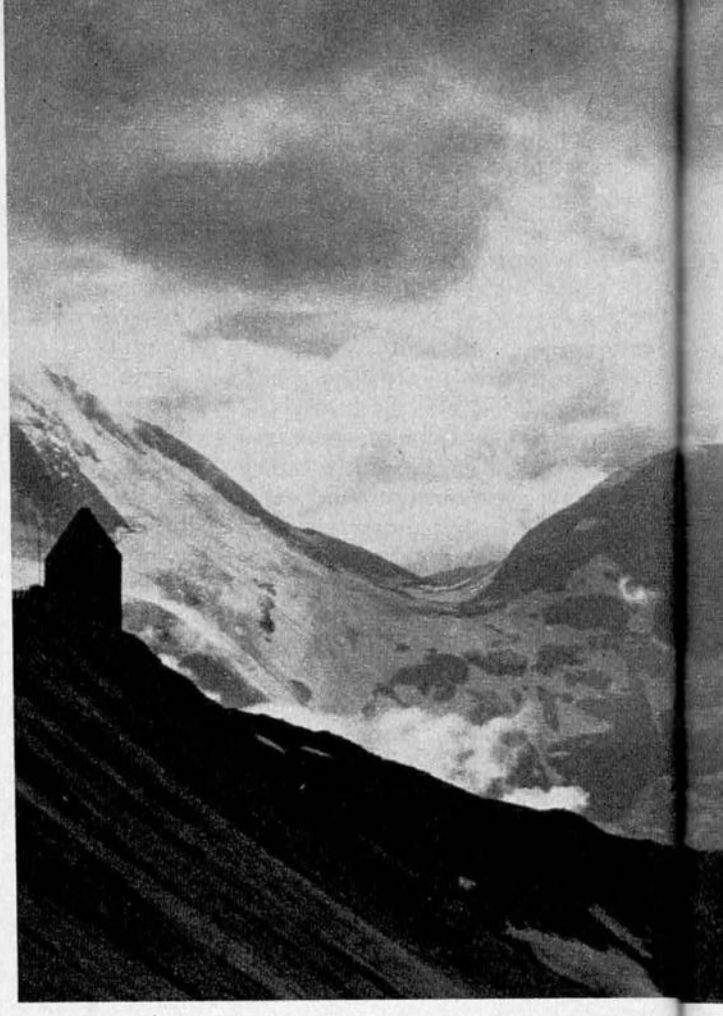
On peut parler de prévision proprement dite dès que l'on peut réduire la marge d'incertitude *a priori* en fonction de la situation actuelle et de son évolution récente.

L'observation des suites de situations météorologiques et l'étude de leur évolution a montré que certains éléments, certaines configurations ont une stabilité suffisante pour que leur identité soit reconnaissable pour des périodes bien supérieures à trois jours. Il en est ainsi des vastes zones dépressionnaires ou des centres de hautes pressions dont le mouvement peut être suivi, et dans une certaine mesure extrapolé. Les méthodes employées pour cela s'apparentent à celles qui ont été utilisées, à plus courte échéance, avant l'apparition des méthodes numériques. On opère, par exemple, en utilisant des cartes moyennes, qui mettent mieux en évidence les configurations de grandes dimensions. On a également recours à l'analogie avec des situations passées.

Peut-on espérer des progrès importants de la prévision au-delà de quelques jours ? Pas dans l'immédiat en tout cas, et l'on rencontre ici une difficulté du même genre que celle rencontrée aux débuts de la météorologie scientifique. On sait maintenant que l'évolution atmosphérique doit être considérée comme un tout à l'échelle de la planète, et malgré les efforts d'organisation poursuivis depuis plus d'un siècle, nous ne sommes pas encore en mesure d'obtenir une image suffisamment précise et simultanée (ou presque) de toute l'atmosphère. Il n'est pas possible, pour des raisons financières, de maintenir un réseau d'observations en surface et en altitude suffisamment dense sur toute la Terre, y compris dans les régions montagneuses, les déserts et les vastes océans de l'hémisphère Sud. Il faut envisager d'autres moyens.

Une des solutions est l'utilisation des satellites. Les données qu'ils fournissent ne sont cependant pas encore assez détaillées, ni assez nombreuses. Elles ne comportent pas encore la mesure assez précise de toutes les grandeurs nécessaires. Mais c'est vraisemblablement la voie à suivre.

On devine déjà que, si l'on envisage l'évolution à l'échelle d'une saison, ce n'est plus seulement l'atmosphère qu'il faudra considérer, mais toute la surface de la planète. Pour élaborer des prévisions, il faudra prendre en compte les échanges entre l'atmosphère et les océans et le sol des continents. Les mouvements des océans eux-mêmes devront être incorporés dans un modèle global.



Une indétermination inéluctable

Nous avons rencontré à plusieurs reprises l'impossibilité pratique de prévoir tous les détails du temps en tous lieux. Cela résulte de la complexité des mouvements atmosphériques et également de la faible durée de certains phénomènes dont la position et l'évolution ne peuvent être prévus qu'à partir du moment où ils existent et sont localisés.

Cette notion est générale en météorologie. Quand un phénomène quelconque peut être individualisé puis suivi dans ses déplacements et son évolution, un certain type de prévision peut être donné sur son état, son activité, sa position future. Pour simplifier, disons qu'il est l'objet d'une prévision déterministe, analogue au calcul de la position d'un corps céleste, toutes proportions gardées quant à la précision, bien entendu.

Avant que le phénomène existe, par contre, ce genre de prévision est impossible, mais l'on peut souvent donner une information utile sur sa possibilité d'apparition, car sa naissance résulte de certaines conditions qui peu-

J.P. Bonnin

vent être elles-mêmes prévisibles.
Lorsque l'échéance des prévisions s'allonge, ceci va s'appliquer à des phénomènes de plus en plus durables qui, les uns après les autres, vont sortir du domaine de la prévisibilité déterministe pour être justiciables de prévisions du type probabiliste. Par exemple, le mauvais temps est souvent associé à une « perturbation » dont l'évolution peut être prévue avec plus ou moins de précision lorsqu'elle a été identifiée et localisée. Que la prévision ne soit pas parfaite ne change rien au principe. Moyennant des dépenses supplémentaires pour les observations ou le traitement numérique, la prévision pourra être améliorée jusqu'au point où des phénomènes de plus petite taille et de vie courte viendront limiter sa précision.
La situation est toute différente si l'on veut prévoir le passage d'une perturbation qui n'existe pas encore. On ne peut plus qu'évaluer la probabilité de formation d'une ondulation sur la limite entre deux masses d'air, indiquer une trajectoire probable, un développement probable.
Il en va de même, finalement, de la prévision de tout phénomène météorologique ; pourvu que l'échéance soit assez longue, il devient impossible de prévoir avec précision son occurrence, mais on peut définir la probabilité pour qu'il se produise.

S'il est actuellement difficile de calculer les incertitudes de la prévision, le météorologiste qui l'élabore a souvent une idée assez bonne de la confiance qu'il peut lui accorder. Il tend à l'expliquer avec des adverbes tels que *probablement, vraisemblablement, etc.* Des expressions telles que « *peut localement donner des orages* », « *possibilité de verglas* », expriment l'impossibilité d'aller trop loin dans le détail. Il ne faut pas interpréter les expressions dubitatives employées dans une prévision comme une précaution du prévisionniste qui n'ose pas avancer un pronostic. L'incertitude doit être communiquée à l'utilisateur dans toute la mesure où on peut l'estimer. C'est une information nécessaire, sans laquelle la prévision n'est plus qu'une prophétie sans valeur.
La prévision météorologique, facteur déterminant dans bien des domaines de l'activité humaine, peut encore, au-dela des améliorations récentes, faire des progrès substantiels. Il est cependant indispensable de reconnaître que, quel que puisse être l'intérêt de prévisions précises pour une échéance aussi lointaine que possible, il est des limites qui font partie de la nature des choses et qui sont infranchissables.
Nous ne sommes cependant pas, et de loin, au bout des possibilités de progrès.

Robert PONE

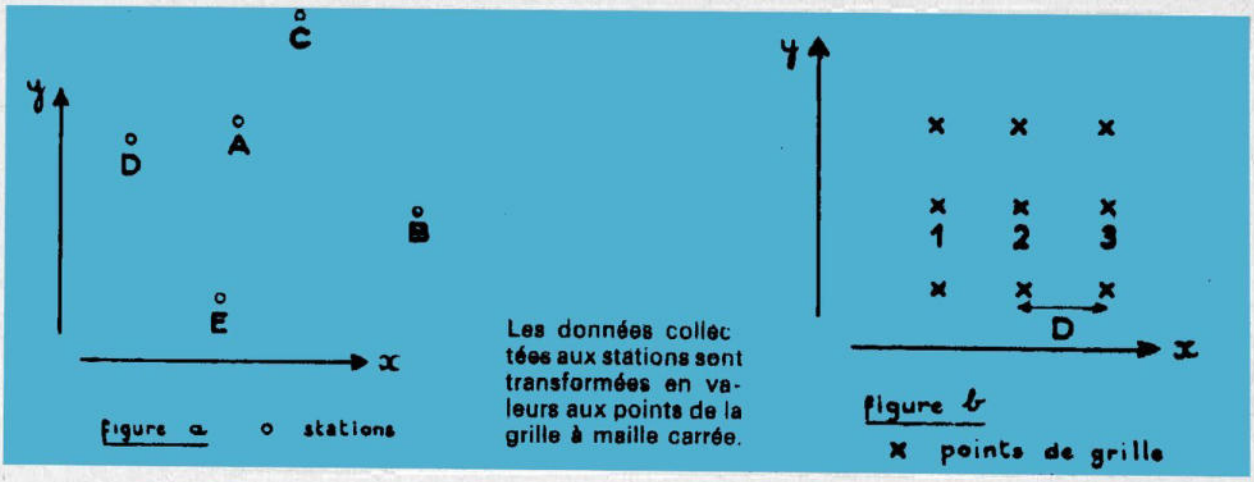
Ordinateurs et prévision

Disons tout de suite que certaines démarches du météorologiste, comme la rédaction d'un bulletin ou le renseignement précis à donner à tel ou tel usager, ne sont pas pour l'instant fondamentalement transformées par l'introduction des techniques nouvelles de prévision numérique. Il s'agit toujours, en l'occurrence, d'interpréter les cartes de prévision (cartes d'isobares au niveau de la mer, cartes de lignes de niveau sur les surfaces isobares d'altitude, cartes de vitesse verticale à grande échelle) en vue d'atteindre la prévision concrète demandée. La modification essentielle apparaît dans les procédés d'obtention de ces cartes. Avant la prévision numérique, les cartes, d'ailleurs à plus courte échéance et moins nombreuses, ne comportant pas en particulier de description de la vitesse verticale, étaient réalisées par extrapolation manuelle. Avec la prévision numérique, elles découlent de la résolution sur calculateur électronique des équations qui régissent l'évolution atmosphérique.

Pour traiter les problèmes évoqués dans cette section, la Météorologie Nationale possède deux calculateurs Control Data 6400. Principales caractéristiques de ces ordinateurs:
— addition d'une part, multiplication ou division d'autre part, effectuées respectivement en 1 et 5,7 microsecondes;
— mémoire rapide de 65 500 mots pour l'un, de 131 000 mots pour l'autre, chaque mot comprenant 60 bits;
— connexion avec mémoires auxiliaires du type bandes magnétiques, disques et tambours.

L'analyse objective, ou de l'irrégulier au régulier

La connaissance de l'atmosphère, qui résulte des différentes mesures effectuées au sol et en altitude, est essentiellement discontinue et irrégulière et, de ce fait, ne se prête guère au calcul numérique sous cette forme.
Considérons en effet la première des deux figures page 89 (figure a) où se trouve pointée, pour un instant donné et différentes stations, la pression réduite au niveau de la mer. Il est très difficile d'exprimer correctement les éléments différentiels que l'on trouve dans toutes les équations régissant le comportement atmosphérique ; par exemple, pour la station A, le taux de variation de pression selon l'axe des x, autrement dit la dérivée partielle de la pression suivant cet axe.
Supposons au contraire que la pression réduite au niveau de la mer soit connue en des points régulièrement disposés formant une grille à mailles carrées (figure b) de dimension D. L'approximation de la même dérivée partielle est en ce cas aisément réalisée. Plusieurs formules sont possibles : la plus simple consiste, par exemple pour le point de la grille numéroté 2, à faire la différence des pressions en 3 et 1 et à diviser cette différence par le double de la distance D.
On devine maintenant quel est l'objet de l'analyse objective : c'est le passage des valeurs relevées aux stations aux valeurs aux points de grille. A cet effet, on se donne une fois pour toutes une grille régulière à mailles carrées, tracée le plus souvent sur une projection stéréographique polaire de l'hémisphère Nord. La dimension réelle de maille D, fonction de la latitude, est de 200 à 400 km aux latitudes moyennes. Le calcul des valeurs aux points de grille à partir des valeurs relevées aux stations est effectué par interpolation.
Un avantage, secondaire mais non négligeable, de l'analyse objective réside en la possibilité de tracer automatiquement les isolignes du champ analysé par l'intermédiaire d'un appareil ap-



pelé traceur de courbes. La comparaison entre les cartes ainsi obtenues et celles résultant de bonnes analyses manuelles montre la qualité des résultats de l'analyse objective.
L'analyse objective s'intéresse dans l'ensemble aux mêmes champs que l'analyse manuelle, à savoir la pression au niveau de la mer, l'altitude et la température des différentes surfaces isobares.

La grille qu'utilise la Météorologie Nationale pour ses problèmes d'analyse et de prévision numériques couvre la majeure partie d'une projection stéréographique polaire de l'hémisphère Nord, atteignant partout des latitudes inférieures à 15°. La dimension réelle de maille est égale à 381 km sur le 60° N et le nombre total de points de grille est de l'ordre de 2 500.
A chaque réseau de 0 000 et 1 200 TU sont réalisées les analyses objectives suivantes:
— pression réduite au niveau de la mer;
— altitude et température de neuf surfaces isobares s'étageant de 850 à 100 millibars.
Durée totale des opérations d'analyse objective: 15 minutes.

Un vocabulaire parfois difficile cache une réalité bien simple

Il n'est sans doute pas inutile de rappeler quelques résultats développés plus longuement par ailleurs.

Tout d'abord, *la façon géostrophique d'envisager le vent.*
A l'échelle du prévisionniste, la composante horizontale du vent, qui l'emporte très largement sur la composante verticale, est à peu près parallèle aux lignes d'égale altitude (isohypses) des surfaces isobares, laisse dans l'hémisphère Nord les altitudes élevées sur sa droite (inversement pour l'hémisphère Sud) et voit sa force croître avec le resserrement des isohypses. Le vent géostrophique systématise les « à peu près » qui précèdent : c'est un vent horizontal, exactement parallèle aux isophyses, dont la force est proportionnelle à la distance séparant deux isohypses consécutives.
Puis, *la notion de « tourbillon »*. Le tourbillon en un point est une grandeur qui, calculée en fonction des vitesses environnantes, représente physiquement le mouvement de rotation de l'air autour du point considéré. Le tourbillon se conserve approximativement et certaines méthodes de prévision sont fondées sur cette idée de la conservation du tourbillon dans le transport des particules.
Enfin, *la vitesse verticale d'ensemble,* autrement dit la composante verticale du vent à l'échelle habituelle de travail du météorologiste. Si cette composante verticale est faible (de l'ordre du centimètre par seconde), elle n'en possède pas moins une importance essentielle. En effet, elle demeure souvent plusieurs heures de même signe pour une même zone géographique. Il en résulte des ascendances ou des affaissements non négligeables. Envisageons, par exemple, le cas de l'ascendance ; ascendance signifie détente, donc refroidissement, donc condensation, nuages et temps médiocre si l'atmosphère était assez humide initialement. C'est l'inverse pour l'affaissement.

Une atmosphère réduite à deux dimensions horizontales

On assimile l'atmosphère à une mince pellicule fluide, à deux dimensions, dont le mouvement d'ensemble peut être représenté par l'écoule-

ment de l'air sur la surface isobare 500 mb, située à peu près au milieu de l'atmosphère. Avec cette représentation assez grossière, on adopte comme hypothèse de travail la conservation du tourbillon, sans les amendements qui permettent de tenir compte de la vitesse verticale d'ensemble. Le modèle d'atmosphère ainsi défini est souvent qualifié, de manière plutôt impropre, de « modèle barotrope ».

Les opérations de prévision numérique se décomposent alors comme suit :

a) de la connaissance initiale de l'altitude de la surface isobare 500 mb en chacun des points de grille, on déduit, pour ces mêmes points de grille, le vent horizontal ; ce passage du champ d'altitude au champ de vent est possible puisque l'on sait que le vent est parallèle aux lignes de niveau et d'autant plus fort que ces lignes de niveau sont plus rapprochées ;

b) connaissant aux points de grille le vent horizontal, on détermine le tourbillon initial ;

c) possédant à la fois le champ de vent horizontal et le champ de tourbillon, on déplace pendant un certain laps de temps (les laps de temps pratiquement adoptés pour ce type de problème sont de l'ordre de une heure) les lignes d'égal tourbillon dans la direction et à la vitesse du vent horizontal ; ce qui revient à dire que l'on calcule en chaque point de grille la variation de tourbillon au cours du laps de temps ;

d) on dispose alors, par une simple addition, des valeurs du tourbillon prévu à l'échéance du laps de temps ;

e) grâce au nouveau champ de tourbillon ainsi obtenu, on atteint, en chaque point de grille, par inversion successive des opérations décrites en b) et a), les nouvelles valeurs des vitesses horizontales et, par suite, des altitudes de la surface isobare 500 mb ;

f) on recommence.

La description qui précède, tout en paraissant très simple au météorologiste, n'apportera sans doute pas toutes les clartés désirables au non-spécialiste. C'est pourquoi il importe de dégager un fait particulièrement important : la construction de la prévision numérique par avances successives dans le temps. Cette caractéristique se retrouvera dans tous les modèles d'atmosphère envisagés.

Le modèle barotrope donne, en dépit, ou peut-être à cause de sa simplicité, des résultats fort honorables. C'est pourquoi, concurremment à d'autres modèles, il est toujours employé par les services météorologiques engagés dans la voie numérique.

La Météorologie Nationale dispose d'un modèle barotrope qui permet de prévoir la topographie de la surface isobare 500 millibars. Echéances: 24 et 48 heures. Temps de calcul pour une prévision à échéance de 24 heures: 3 minutes.

Où la dimension verticale est réintroduite

De la même manière que le modèle barotrope permet la prévision de l'altitude de la surface isobare 500 mb à partir d'elle-même, les modèles à plusieurs niveaux — on dit encore baroclines — dont il sera question ici prennent comme base de départ la connaissance initiale de la topographie de plusieurs surfaces isobares et calculent les topographies futures de ces mêmes surfaces.

L'équation essentielle est toujours l'équation de la conservation du tourbillon, mais écrite maintenant pour un milieu à trois dimensions. Autrement dit, cette équation ne fera plus seulement appel à l'altitude de la surface isobare considérée, altitude d'où découlent le vent horizontal et le tourbillon, mais aussi à la vitesse verticale d'ensemble.

Mais l'équation de la conservation du tourbillon ainsi envisagée ne suffit plus à résoudre le problème de prévision numérique puisque deux quantités entrent en jeu : l'altitude des surfaces isobares et la vitesse verticale d'ensemble.

On introduit alors une équation thermodynamique qui va exprimer, en chaque point de grille, la variation de la température.

L'équation thermodynamique fera intervenir :

— la température, bien évidemment ;

— l'altitude de la surface isobare sur laquelle on se place et, par suite, le vent horizontal qui joue dans le sens du réchauffement local s'il souffle du chaud vers le froid, et inversement ;

— la vitesse verticale d'ensemble, puisqu'on a vu précédemment qu'à une ascendance correspond un refroidissement et vice-versa ;

— d'éventuels apports de chaleur non décrits dans les processus impliqués ci-dessus et dont le rôle ne devient important que pour des prévisions à échéance de plus de deux jours.

On doit remarquer que l'introduction de l'équation thermodynamique ne résout rien ; en effet, si l'on possède bien deux équations, il faut traiter trois quantités : altitude des surfaces isobares, vitesse verticale d'ensemble et température.

Mais température et altitude des surfaces isobares se déduisent l'une de l'autre, la différence d'altitude entre deux surfaces isobares

permettant le calcul de la température moyenne de l'atmosphère entre ces deux surfaces. Pour comprendre cette relation, il suffit d'appliquer la loi de l'hydrostatique ; cette dernière montre tout de suite que, pour une variation de pression donnée, la variation d'altitude est inversement proportionnelle à la densité, donc proportionnelle à la température.

Le système est maintenant fermé — nombre d'équations égal au nombre de quantités à déterminer — et offre la possibilité de concevoir différents modèles de prévision : modèles à deux, trois, quatre ou cinq niveaux suivant que l'on veut décrire le géopotentiel de deux, trois, quatre, ou cinq surfaces isobares.

Les processus numériques sont plus complexes que ceux du modèle barotrope, la complexité croissant d'ailleurs très vite avec le nombre de niveaux. Les résultats sont, pour une même échéance, légèrement supérieurs à ceux du modèle barotrope et surtout moins sommaires ; on prévoit en effet, par l'intermédiaire de leur topographie, l'écoulement sur plusieurs surfaces isobares et non plus sur une seule et, surtout, on dispose de la vitesse verticale d'ensemble qui apparaît, à chaque avance dans le temps, comme un élément fondamental du calcul au même titre que les variations d'altitude des surfaces isobares.

La Météorologie Nationale dispose d'un modèle barocline (filtre) qui permet de prévoir la topographie des surfaces isobares 850, 500 et 200 millibars, ainsi que la pression réduite au niveau de la mer et la vitesse verticale au niveau 650 millibars.
Echéances: 24 et 48 heures. Temps de calcul pour une prévision à échéance de 24 heures: 20 minutes.

Où « primitif » devient synonyme de moderne

Une remarque essentielle s'impose au point où nous sommes maintenant rendus : quels que soient les modèles de prévision numérique jusqu'ici envisagés, nous avons toujours imposé la liaison géostrophique entre vent horizontal et altitude des surfaces isobares. Enumérons rapidement les avantages inhérents à cette procédure :

a) le nombre de quantités à traiter est diminué puisque les deux composantes horizontales du vent (disons les composantes selon les axes de la grille) n'apparaissent jamais explicitement ;

b) le système d'équations correspondant ne décrit que les phénomènes présentant un véritable intérêt météorologique. Les autres phénomènes d'échelle plus fine, sans intérêt pour la prévision du temps, ne sont pas pris en compte ; ils sont « filtrés », d'où le nom d'« équations filtrées » donné au système développé au paragraphe précédent ;

c) on montre que la valeur de l'avance dans le temps est inversement proportionnelle à la vitesse maximale de propagation des phénomènes appréhendés par le modèle. Or, les phénomènes d'échelle fine, qu'ignorent les équations filtrées, sont ceux dont la vitesse de propagation est la plus grande. Les équations filtrées permettent donc un allongement de l'avance dans le temps, qui est de l'ordre de une heure pour des dimensions de mailles de trois cent kilomètres.

A côté de ces avantages existent bien sûr quelques inconvénients non négligeables. Signalons les deux principaux :

a) le système possède, sur le plan mathématique, un caractère hautement implicite, d'où difficultés de résolution numérique ;

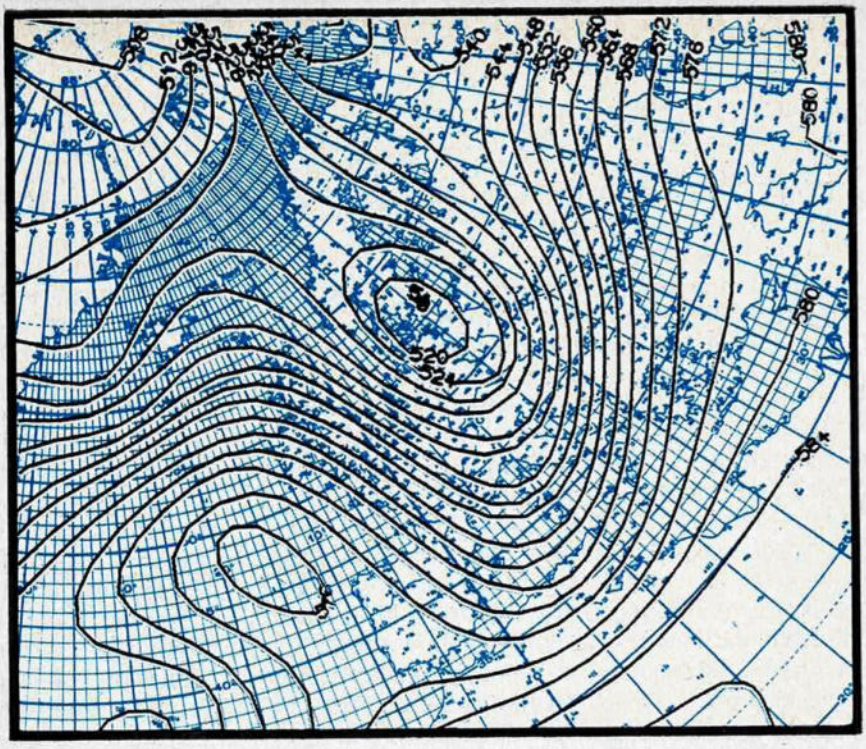
b) on ne peut séparer totalement les diverses échelles atmosphériques ; aussi altère-t-on légèrement le comportement des phénomènes d'intérêt véritablement météorologique, qui sont seuls conservés dans les équations filtrées.

Mais, plutôt que de traiter plus avant des avantages et des inconvénients des équations filtrées, il est maintenant nécessaire de voir s'il y a un autre système à leur opposer.

Evidemment, oui ! C'est, à une variante près, le système bien connu des mécaniciens des fluides qui comporte cinq équations pour prévoir cinq quantités, à savoir les deux composantes horizontales du vent (1), la vitesse verticale d'ensemble, la température et l'altitude des surfaces isobares de référence.

La variante signalée ci-dessus consiste à considérer que la liaison verticale entre pression, altitude et température est celle qui existerait si l'atmosphère était au repos (hypothèse d'équilibre statique, qui a d'ailleurs pour effet de filtrer les ondes acoustiques). Cette restriction n'enlève pratiquement rien à la généralité du système en question que l'on appelle en conséquence système d'équations primitives.

(1) Si la prévision numérique basée sur les équitations primitives fait évoluer indépendamment de l'altitude des surfaces isobares les deux composantes horizontales du vent, celles-ci sont cependant obtenues initialement à partir de celle-là par application de la relation géostrophique qui demeure ensuite approximativement vérifiée tout au cours des avances dans le temps.



Un fragment d'une carte établie le 29 mars 1970 à 0 heure par analyse « objective », en utilisant les méthodes traditionnelles. La représentation porte sur la surface isobare 500 mb, les isohypses, où lignes d'égale altitude sont cotées en décamètres.

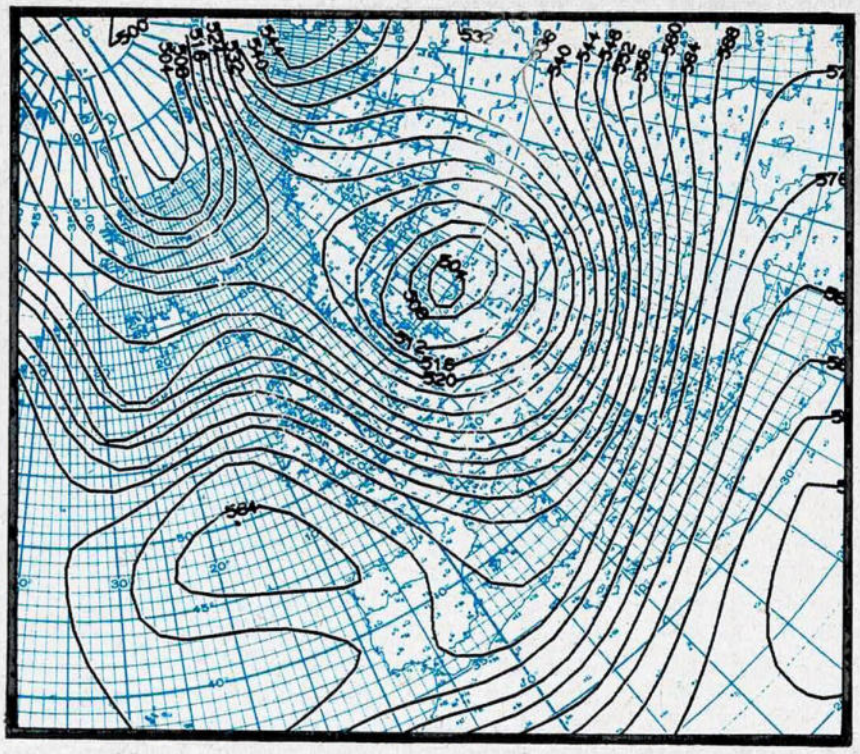
Un certain nombre de phénomènes sans intérêt météorologique, d'échelle fine à propagation rapide, telles les ondes de gravité, sont pris en compte par les équations primitives. Il en résulte une diminution de la valeur de l'avance dans le temps qui, si l'on se réfère toujours à une dimension de maille de trois cents km, devient de l'ordre de dix minutes. Il s'agit là du principal inconvénient que présentent les équations primitives. Mais cet inconvénient perd de son importance puisque la capacité et la rapidité de calcul des ordinateurs sont en progrès continuel. Aussi ne faut-il pas s'étonner de la faveur dont commencent à jouir les équations primitives qui tendent à remplacer peu à peu les équations filtrées.

La Météorologie Nationale dispose d'un modèle barocline à équations primitives dont la définition verticale est assez fine pour permettre de prévoir la pression au niveau de la mer et, outre la température et la vitesse verticale, la topographie de n'importe quelle surface isobare située entre 1 000 et 100 millibars.
Echéances: 24, 48 et 72 heures.
Temps de calcul pour une prévision à échéance de 24 heures: 1 heure.

On ne peut conclure un exposé, si bref et si incomplet soit-il, sur les équations primitives sans rappeler qu'elles servirent de système fondamental au Britannique L.F. Richardson qui, dans un effort héroïque et malheureux, tenta dès 1922 d'appliquer les méthodes numériques au problème de la prévision du temps.

Où l'on a quelques raisons d'être satisfait

La plus belle récompense du météorologiste spécialisé en prévision numérique, et aussi la meilleure preuve de la valeur de ses résultats, est la confiance croissante que lui accorde son collègue chargé d'interpréter les cartes obtenues sur calculateur en vue de la description concrète du temps futur.
Mais ce point de vue subjectif ne suffit pas et il est nécessaire de chiffrer la qualité d'une prévision numérique. Nous adopterons un indice (S), variant de 0 à 100 et d'autant plus élevé que le vent géostrophique prévu est plus proche du vent géostrophique réel. Il s'agit d'ailleurs d'une notation très sévère : à partir de 10, la prévision est loin d'être sans valeur, elle est excellente pour un score de 50 et parfaite si S est égale à 100.
Nous donnons ci-après des statistiques issues, non pas de la Météorologie Nationale Française où la prévision numérique opérationnelle vient tout juste de démarrer, mais de l'*U.S. Weather Bureau* qui dispose depuis déjà quelques années de modèles proches de ceux décrits précédemment.



Cette carte, comparée à celle de la page de gauche, donne une idée des possibilités des ordinateurs. Il s'agit de la prévision à échéance de 48 h de la surface 500 mb, établie le 27 mars 1970 à 0 heure.

Prévision niveau mer à échéance de 30 heures

manuelle	S = 10
équations primitives sans retouches manuelles	S = 20
équations primitives avec retouches manuelles	S = 30

Prévision 500 mb à échéance de 36 heures

manuelle	S = 20
barotrope	S = 40
filtrée trois niveaux	S = 50
équations primitives à définition verticale fine	S = 57

On voit tout de suite l'importance de l'amélioration apportée par le développement des méthodes modernes. Cependant, la prévision numérique présente encore de nombreuses insuffisances. Signalons les deux principales :
— la détérioration rapide de la valeur des prévisions avec l'accroissement de l'échéance, détérioration telle qu'au-delà de quatre ou cinq jours les cartes prévues ne sont pratiquement plus utilisables ;
— l'impossibilité, liée à la trop grande dimension de maille, de saisir des phénomènes d'échelle fine qui, comme certaines petites dépressions de quelques centaines de kilomètres de diamètre, ont parfois une influence décisive sur le temps.
Ces insuffisances ne résultent pas d'un vice fondamental, mais rappellent plutôt que la prévision numérique sort à peine de ses premiers balbutiements et que de grands progrès sont encore à attendre. En ce qui concerne l'allongement de l'échéance, nous sommes persuadés que dans une dizaine d'années les cartes à échéance de cinq à sept jours seront aussi bonnes que le sont maintenant les cartes à échéance de quarante-huit heures. Quant aux phénomènes d'échelle fine, des méthodes sont déjà mises au point pour essayer de les appréhender.

Jean LE PAS

Un allongement de l'échéance des prévisions numériques est actuellement à l'étude à la Météorologie Nationale. En voici le principe:
— prévisions à échéance de 48 ou de 72 heures par l'intermédiaire du modèle le plus complexe, c'est-à-dire le modèle à équations primitives ;
— aux prévisions ainsi réalisées, application du modèle barocline filtré pour une échéance de 36 ou 48 heures.
Cette procédure doit permettre d'atteindre l'échéance de quatre ou cinq jours : les premiers résultats obtenus sont encourageants.

L'adaptation régionale des prévisions

Quels phénomènes prévoit-on actuellement par les méthodes objectives dont dispose le météorologiste ? Ce sont essentiellement les grands mouvements de l'atmosphère : la position des anticyclones et des dépressions, l'intensité des courants-jets, l'évolution des grandes masses d'air. Ces phénomènes s'étendent sur de vastes régions, le plus souvent sur plusieurs milliers de kilomètres carrés, comme le montrent les cartes sur lesquelles sont tracés les résultats des prévisions numériques. La connaissance de l'évolution de ces grands ensembles atmosphériques est indispensable pour prévoir le temps à grande échelle, mais est insuffisante pour le prévoir dans le détail. Il faudrait pouvoir localiser avec précision les surfaces de séparation des différentes masses d'air, déterminer les zones de précipitations et de temps clair, etc. Une finesse beaucoup plus grande des méthodes d'analyse et de prévision est nécessaire pour ces phénomènes.

Pour déduire le temps sur la France, on utilise des cartes de tout l'hémisphère Nord ou d'une bonne partie de celui-ci. La limite de résolution des méthodes actuelles est ainsi sensiblement inférieure à celle des photographies de la Terre prise depuis la Lune. Il reste au météorologiste qui effectue des prévisions régionales et locales un grand travail d'adaptation. Ne pourrait-on pas, par des méthodes objectives appropriées, lui fournir des renseignements plus précis ?

Les calculateurs ne sont pas assez rapides

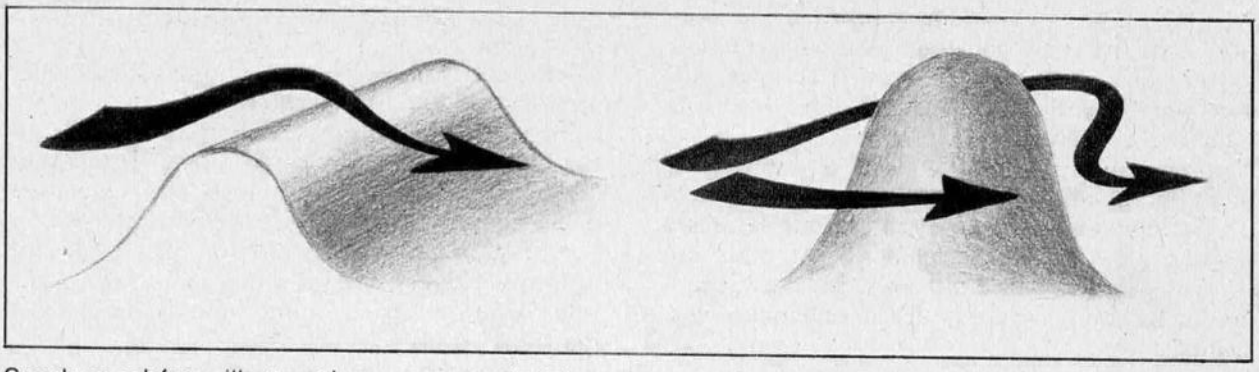
On peut songer d'abord à améliorer la finesse des modèles de prévision numérique. Deux problèmes se posent alors. Le premier concerne les possibilités pratiques de calcul. Une prévision doit, pour être utile, s'effectuer le plus rapidement possible et, en tout état de cause, la simulation numérique doit devancer la réalité. Pratiquement, une prévision à 48 heures perd beaucoup de son intérêt si elle exige un temps de calcul supérieur à quelques heures. Les modèles atmosphériques actuels ne peuvent être mis en œuvre qu'avec les calculateurs électroniques les plus perfectionnés et si on voulait diviser par 10 la résolution linéaire de ces modèles, le temps de calcul serait multiplié par 1 000. Cette dernière résolution est pourtant tout juste suffisante pour différencier les climats régionaux français.

Notre mauvaise connaissance de la structure fine de l'atmosphère constitue un deuxième obstacle. Le réseau mondial de mesures en altitude suffit à peine, en effet, à fixer les conditions initiales des modèles de prévision dans leur forme actuelle, surtout au-dessus des océans.

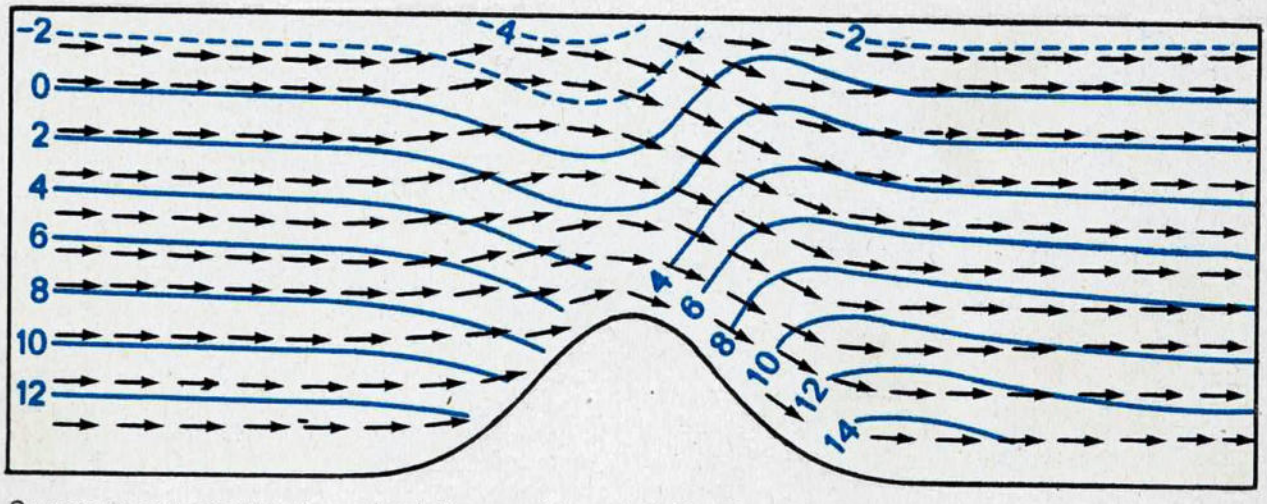
Augmenter considérablement la résolution des modèles afin de fournir des prévisions régionales parait donc impossible dans un proche avenir. Certes, les météorologistes attendent beaucoup, au cours de la prochaine décennie, de l'amélioration des moyens de calcul électronique et de l'utilisation de satellites artificiels, mais on ne peut espérer que les progrès réalisés dans ces deux domaines permettront de résoudre à la fois le problème de la prévision générale et celui de la prévision régionale. En réalité, et heureusement, le problème de la prévision régionale peut se poser en des termes différents. La question est la suivante : si la situation météorologique générale peut être prévue, quelle conséquence peut-on en tirer sur le plan régional, et peut-on en particulier prévoir des éléments n'apparaissant pas dans la prévision générale ? L'influence du relief sur le climat local montre en effet que des phénomènes peuvent être prévus sans qu'il soit nécessaire d'avoir une connaissance très détaillée des conditions atmosphériques locales.

Le relief et le temps

Qui n'a pu constater que, parfois, des conditions atmosphériques très différentes règnent sur les deux versants opposés d'un massif montagneux ? Très souvent un versant est ensoleillé, alors que sur l'autre le temps est couvert et pluvieux. Par suite de la prédominance au cours de l'année de certains vents, ce phénomène peut devenir systématique et se refléter dans la végétation elle-même. Dès lors, on comprend, que, suivant la configuration du



Ces deux schémas illustrent le mouvement de l'air au passage d'un obstacle. A gauche : l'air se soulève pour franchir la chaîne de montagnes et redescend en s'accélérant de l'autre côté de la paroi. A droite : l'air contourne la montagne, le vent se renforce beaucoup sur la gauche de la montagne (effet de la rotation terrestre).



Ce croquis est le resultat d'une simulation numérique de l'effet d'une chaîne montagneuse sur une atmosphère stable ; il a été effectué automatiquement par une table traçante, utilisant directement les résultats obtenus par calculateur. La longueur des flèches est proportionnelle à la vitesse du vent, les températures en rouge sont exprimées en degrés C. On remarque en aval de la montagne le renforcement du vent et l'effet de foehn.

terrain, il puisse exister une grande variété de climats et qu'un flux général régnant sur l'ensemble de la France produise des « temps » assez différents selon la région.

L'effet général du relief est, en première analyse, assez évident. Une paroi montagneuse de grande longueur obligera l'air venant la frapper à se soulever pour la franchir et à redescendre sur l'autre versant. Les mouvements ascendants favorisent la condensation de la vapeur d'eau, la formation de nuages et les précipitations, alors que le mouvement descendant aval entraînera évaporation et ciel clair. S'il s'agit d'une montagne isolée, un effet de contournement à la base par les masses d'air se produit qui limite les mouvements ascendants. Il est, de même, facile à comprendre que si un étroit passage existe entre deux massifs montagneux, l'air s'y engouffrera et que le vent y sera parfois très fort (cas du mistral dans la vallée du Rhône).

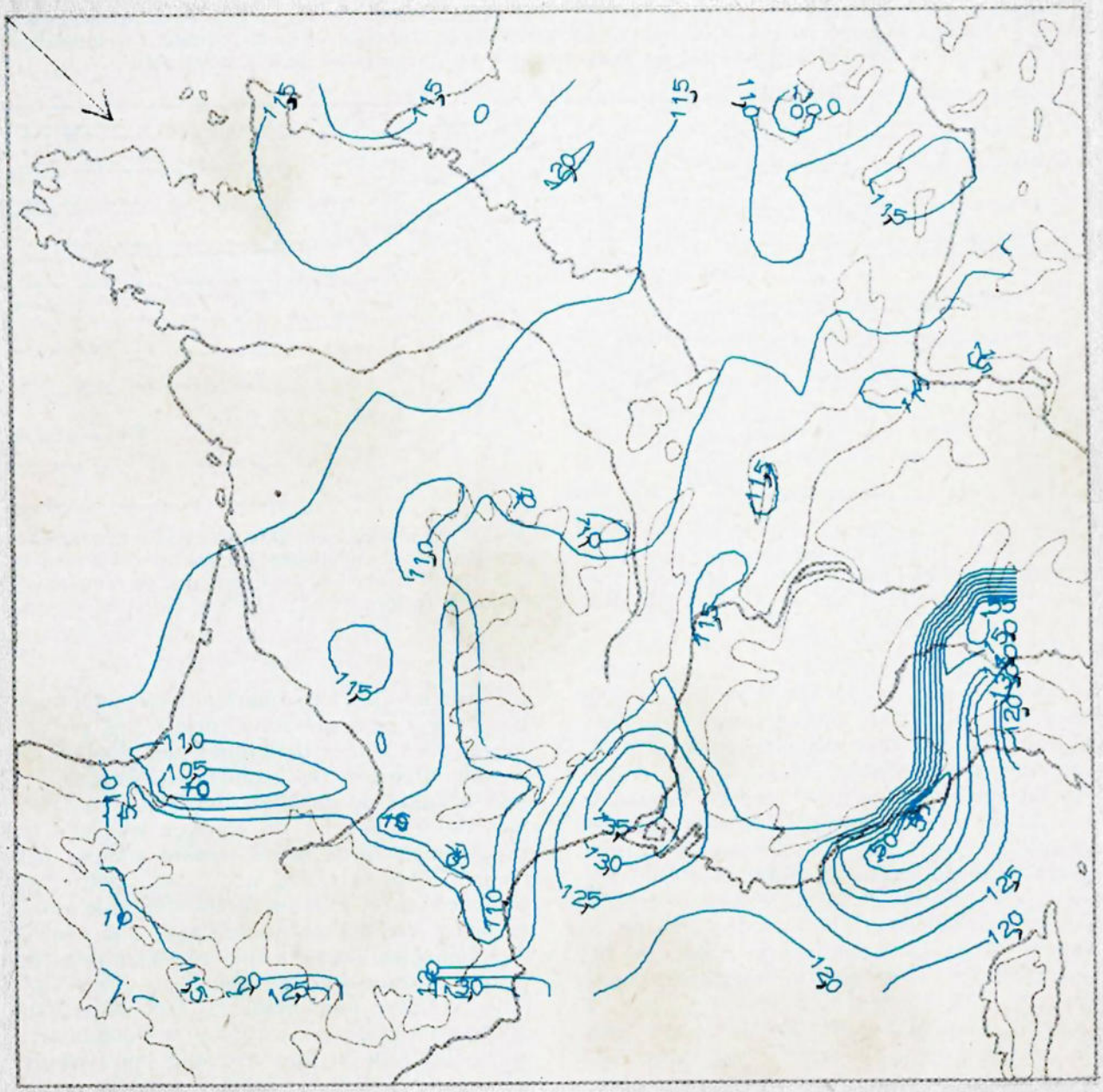
Cette première analyse a besoin d'être complétée d'informations quantitatives permettant d'aboutir à une prévision précise des phénomènes. Des études théoriques, des simulations en laboratoire et des simulations sur calculateur à l'aide de modèles numériques permettent de préciser ou de corriger les données précédentes et de mieux rendre compte des phénomènes réels. On peut ainsi mettre en évidence le rôle joué par la stabilité et la vitesse d'une masse d'air franchissant une chaîne de montagnes. Lorsque l'air est stable (lorsque sa température diminue assez peu avec l'altitude ou même augmente), les filets d'air sont rabattus en aval : ceci entraîne une augmentation notable de la force du vent, un effet de compression et une élévation sensible de la température. C'est le phénomène de foehn qui joue un rôle important dans les régions montagneuses et aux alentours.

Les effets de contournement peuvent également être étudiés quantitativement. Il convient, lorsque les massifs montagneux sont suffisam-

ment importants, de tenir compte de la rotation terrestre. On constate alors que le contournement se fait dissymétriquement et surtout par la gauche, ce qui donne des vents plus forts de ce côté.
L'importance relative des effets de contournement horizontal et de déplacement vertical dépend évidemment de la stabilité de la masse d'air. L'effet de contournement sera plus important pour de l'air froid près du sol, particulièrement stable vis-à-vis des mouvements verticaux.

La géographie en équations

En France, un modèle numérique est actuellement à l'étude qui permettra de prendre en compte tous ces effets, quels que soient la situation atmosphérique et le relief. Il doit permettre de répondre en partie aux exigences de la prévision régionale. Il n'est besoin, dans ces conditions, que de définir les conditions atmosphériques initiales d'une façon très générale. Une prévision numérique à 48 heures peut être utilisée.



Voici le résultat, obtenu par calculateur, de la simulation de l'action du relief de la France sur un flux d'air venant du nord-ouest. La figure représente la répartition horizontale des températures à 500 m d'altitude; les isothermes sont cotées en dixièmes de degrés. On constate que la température qui valait initialement 11,75 °C sur tout le domaine a évolué, un effet de foehn important (+ 5 °C) se produit sur la Côte d'Azur et la Vallée du Pô; l'effet de foehn causé par le Massif Central dans la région de Nîmes est moindre (+ 2 °C) et un refroidissement (— 1,5 °C) se produit dans la région de Pau, au pied des Pyrénées occidentales.

SOUS LE SIGNE DE LA COOPERATION INTERNATIONALE, L'OBSERVATION METEOROLOGIQUE TIENT UNE GRANDE PLACE DANS L'ACTIVITE DES MISSIONS POLAIRES. CE MAT « METEO » PLANTE SUR LE SOL GLACE DU GROENLAND, CHARGE NON SEULEMENT D'INSTRUMENTS DE MESURE, MAIS AUSSI DE MULTIPLES PAVILLONS NATIONAUX, A VALEUR SYMBOLIQUE.

Expéditions polaires françaises

L'adaptation régionale des prévisions

Le modèle mathématique est, dans son principe, analogue aux modèles habituels de prévision numérique, mais il a une définition horizontale beaucoup plus fine, permettant de définir la topographie de façon détaillée. On constate qu'une simulation de quelques heures suffit à faire apparaître les perturbations créées par le relief. On parvient ainsi à prévoir numériquement des effets régionaux importants, comme les vents (mistral, tramontane, etc.), les zones dépressionnaires d'origine orographique (dépression du Golfe de Gênes), les effets de foehn créés par les Alpes, les Pyrénées ou le Massif Central. Dans certains cas ces effets induits par le relief peuvent prendre une grande extension et intéresser une partie importante du territoire français.

Le calcul quantitatif des vitesses verticales, calcul qui tient compte assez finement du relief, doit permettre de préciser la quantité des précipitations (en particulier celles d'origine orographique). Cette prévision a un intérêt économique considérable.

Si le relief joue un grand rôle dans la détermination des climats français, il n'est pas le seul facteur agissant à l'échelon régional susceptible d'être pris en compte. La température au sol intervient largement dans des phénomènes localement importants, par exemple dans les brises de mer et de terre dont est responsable le contraste thermique entre terre et océan, dans les phénomènes d'instabilité convective qui peuvent se manifester par des nuages bourgeonnants (cumulus, comulonimbus) et des orages. Or, la température du sol dépend beaucoup de sa nature et en particulier de sa capacité calorifique, de son comportement vis-à-vis du rayonnement solaire, mesuré par son « albedo » (rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident), etc. La « rugosité » du sol intervient également pour fixer l'intensité et la direction du vent dans les basses couches de l'atmosphère. Il convient donc de définir la surface terrestre non seulement par son relief mais aussi par d'autres caractéristiques : mer, neige, terres cultivées, forêts... Tout ceci doit être pris en compte dans un modèle numérique d'adaptation des prévisions.

D'autres méthodes objectives peuvent être employées pour la prévision régionale et locale, méthodes qui ne fournissent pas une explication des phénomènes mais permettent dans une certaine mesure de les prévoir. Il s'agit de méthodes statistiques qui ont pour but d'exploiter automatiquement les renseignements fournis par des dizaines d'années d'observation.

Ces méthodes n'ont longtemps donné que des résultats limités. Il y a à cela plusieurs raisons. D'abord le nombre de paramètres devant être considérés pour en prévoir un autre est considérable. Ceux utilisés l'ont été souvent pour des raisons pratiques uniquement : on a cherché, par exemple, à prévoir un paramètre local à l'aide d'autres paramètres mesurés aux mêmes endroits, les jours précédents, car cette information était la seule utilisable sur des périodes de temps assez grandes. Or les méthodes de prévision ont progressé dès qu'elles ont pu tenir compte des observations sur de vastes surfaces autour du domaine de prévision choisi. On a d'ailleurs voulu utiliser les méthodes statistiques de façon autonome sans le plus souvent tenir compte des connaissances mécaniques et physiques qu'on possédait déjà sur les processus atmosphériques. Il semble aujourd'hui que, utilisées en liaison avec les méthodes de prévision numérique, ces méthodes puissent fournir des résultats intéressants.

L'exemple de la prévision quantitative des précipitations est caractéristique. La pluie est un paramètre difficile à prévoir car sa formation fait entrer en jeu un grand nombre de processus physiques qu'il est impossible de décrire complètement dans un modèle mathématique ou physique. On sait par contre prévoir, à l'aide de modèles, des paramètres qui influencent beaucoup la formation des précipitations et qui sont très difficilement accessibles à l'observation. C'est le cas pour la vitesse verticale de l'air. On peut faire une étude statistique en un lieu donné des précipitations, de la vitesse verticale de l'air et d'autres paramètres accessibles aux méthodes de prévision numérique (comme le vent et la stabilité de l'air) et calculer la relation existant entre tous ces éléments.

Par un emploi conjugué de la prévision numérique, qui utilise notre connaissance des processus atmosphériques, et des méthodes statistiques, qui reposent sur notre expérience du temps passé, on peut arriver, sinon à prévoir exactement le temps qu'il fera, du moins à réduire constamment l'incertitude à mesure que les méthodes objectives se développent.

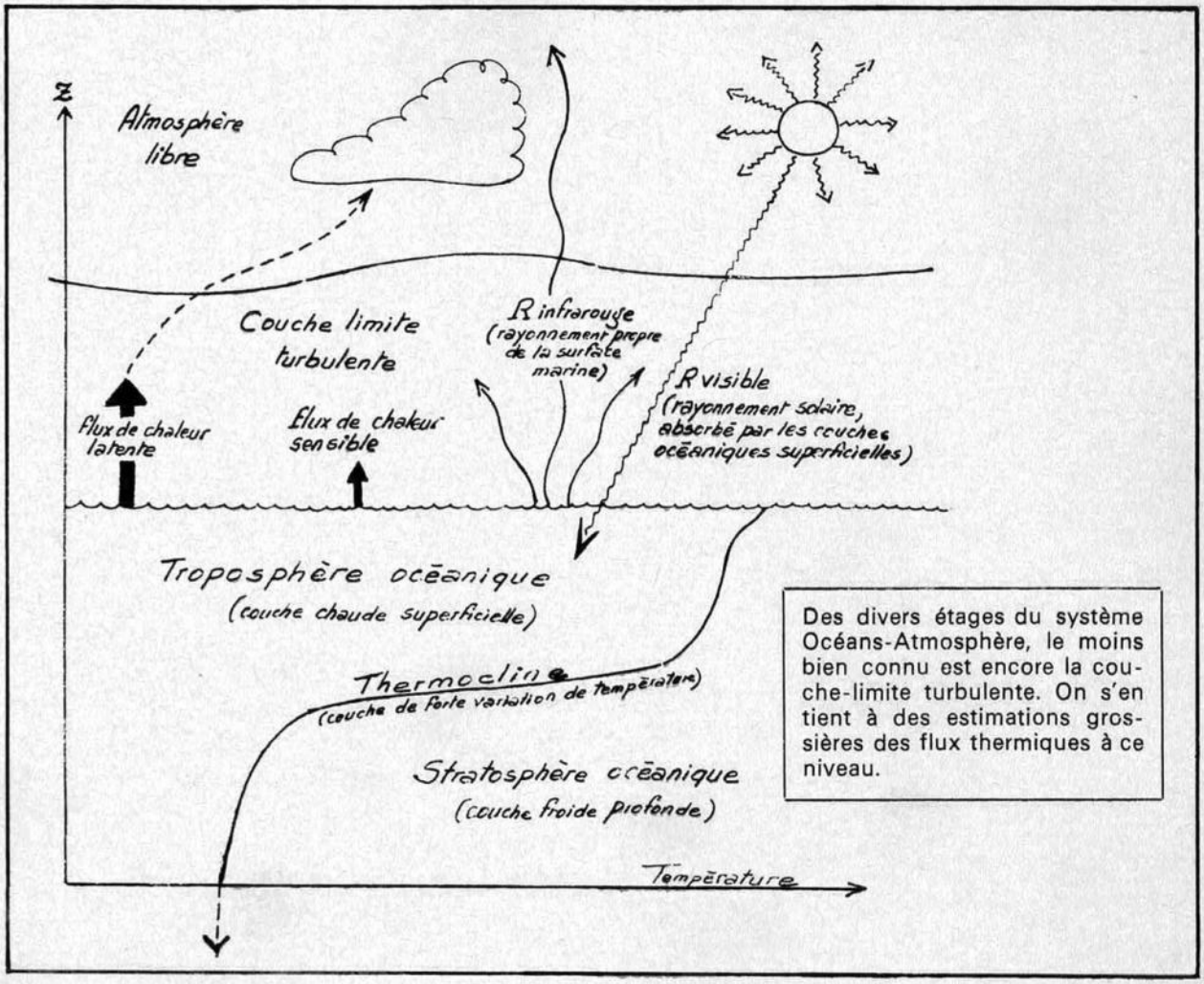
D. ROUSSEAU

Les échanges océans-atmosphère

Le fluide atmosphérique est limité à sa base par la surface rigide des continents (29 %) et par la surface libre des océans (71 %). Plus encore que les reliefs élevés des continents, ce sont surtout les océans qui, en définitive, déterminent les traits généraux des mouvements de l'atmosphère.

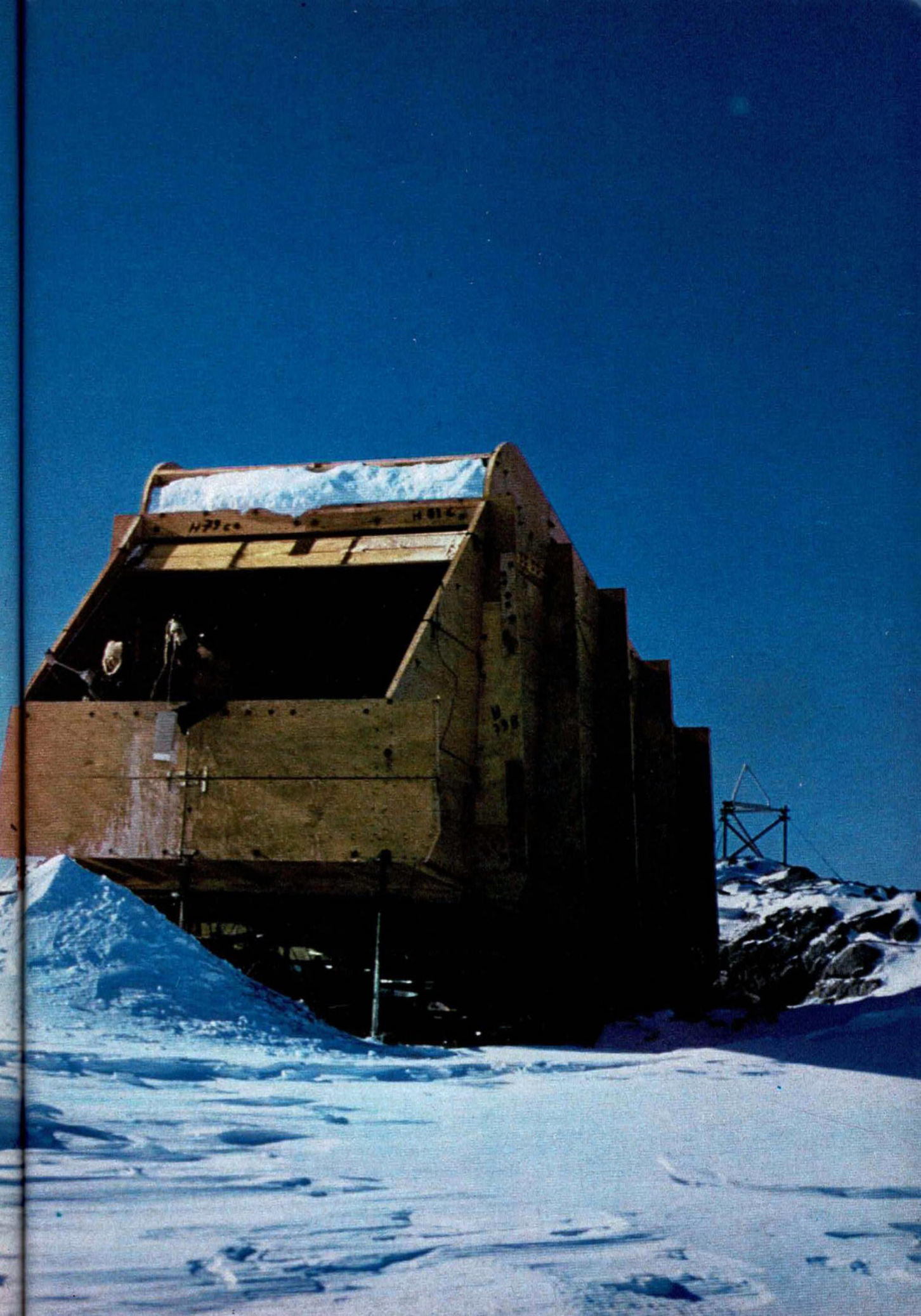
Le flux thermique

Les océans constituent la principale source chaude de la « machine thermique » atmosphérique. Ils fournissent de la chaleur :
— *directement*, dans la proportion de 10 %, sous forme de « chaleur sensible », la température superficielle de la mer étant le plus souvent supérieure à la température de l'air ;
— *indirectement*, dans la proportion de 90 %, par évaporation ; la vapeur d'eau, en se condensant ultérieurement, sous forme de nuages, libère sa chaleur latente dans l'atmosphère.
Les flux instantanés de chaleur sensible et de vapeur d'eau qui traversent la surface de la mer sont liés à la turbulence de l'air dans les couches superficielles (couche limite turbulente) ainsi qu'à un grand nombre de variables météorologiques. L'évaluation précise de ces flux constitue, à l'heure actuelle, un problème fondamental.
En France, des études sont poursuivies à l'Ins-



Des divers étages du système Océans-Atmosphère, le moins bien connu est encore la couche-limite turbulente. On s'en tient à des estimations grossières des flux thermiques à ce niveau.

LACHE D'UN ABRI SPECIALISE, UN BALLON METEO QUITTE LE SOL DE LA TERRE-ADELIE. LA NACELLE CHARGEE D'INSTRUMENTS DE MESURE VA S'ELEVER DANS SON SILLAGE.



titut de mécanique statistique de la turbulence, à Marseille, où une simulation en laboratoire des phénomènes à *échelle fine* est effectuée. Dans ce but, ce laboratoire va être équipé d'une soufflerie de grandes dimensions installée sur un plan d'eau de 40 m de long sur 3 m de large.

A l'échelle immédiatement supérieure (*petite échelle*), des études sont effectuées sur la « bouée-laboratoire » du C.N.E.X.O. par les océanographes du Muséum National d'Histoire Naturelle.

Par ailleurs, des campagnes de mesure à *échelle moyenne* portant sur des zones de quelques centaines de kilomètres carrés ont lieu périodiquement, en particulier en Méditerranée et en Atlantique. Ces campagnes sont menées conjointement par les météorologistes et les océanographes de plusieurs pays qui mettent leurs moyens en commun. Elles donnent lieu à l'exécution de très nombreuses mesures, à la fois dans la mer et dans la basse troposphère atmosphérique.

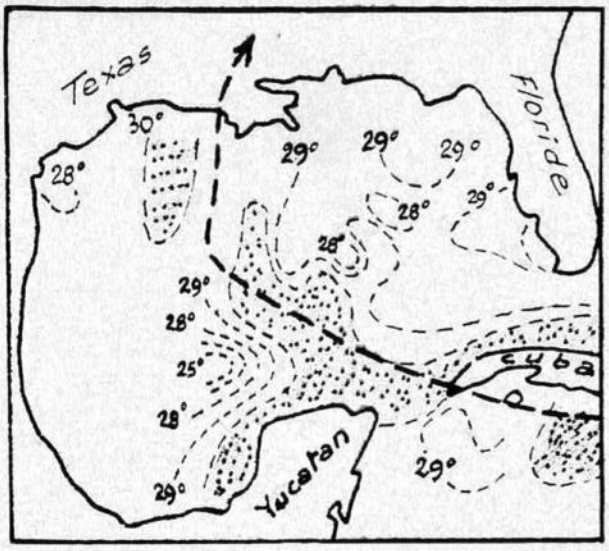
Tous ces travaux, qu'ils soient théoriques ou expérimentaux, aboutissent à des résultats extrêmement complexes. Aussi le météorologiste doit-il recourir à la « méthode des paramètres » qui consiste à exprimer un phénomène en fonction de paramètres connus, de grande échelle en l'occurrence :

— la température superficielle de la mer ;
— la température et l'humidité de l'air ;
— le vent superficiel ;
— l'énergie solaire incidente et la nébulosité.

Des analyses quotidiennes de ces éléments du flux thermique sont élaborées quotidiennement depuis quelques années. Ces analyses permettent de mettre en évidence une étroite corrélation morphologique entre les « individus météorologiques classiques » (dépressions barométriques, anticyclones, fronts froids et chauds, lignes d'égale variation de pression...) et les zones de maximum ou de minimum du flux thermique.

Les fortes valeurs du flux thermique sont généralement situées dans la partie occidentale des dépressions atmosphériques (occupées par l'air « froid »), alors que les faibles valeurs, voire des valeurs négatives (mer plus froide que l'air) sont, au contraire, associées à la partie orientale des dépressions (occupées par l'air « chaud »).

Plus encore que les valeurs elles-mêmes du flux thermique, ce sont les contrastes de ces valeurs, c'est-à-dire les gradients, qui semblent avoir la plus grande valeur prévisionnelle. Lorsqu'une zone océanique où ce flux est considérable avoisine une zone de flux faible, voire négatif, on peut s'attendre, un ou deux jours plus tard, au « creusement » d'une dépression.



Température superficielle de la mer les 25, 26 et 27 septembre 1964 (moyenne) et trajectoire du cyclone Hilda (d'après G. Taylor, Weather Bureau).

Les cyclones tropicaux, qui sont des dépressions de très petites dimensions, sont, comme les dépressions extratropicales, conditionnés par le flux thermique, et leurs trajectoires suivent souvent les « langues » d'eau chaude. Dès qu'un cyclone aborde le continent, privé de sa source d'énergie, il s'affaiblit considérablement. Mais si sa trajectoire, plus ou moins incertaine, le ramène sur l'océan, il ne tarde pas à se « régénérer ».

Dans la mesure où le flux thermique n'a pu être calculé, la température superficielle de la mer apparaît comme un élément important des prévisions météorologiques. C'est elle que les modèles numériques usuels utilisent, et cette substitution est, dans l'état actuel de nos connaissances, suffisante.

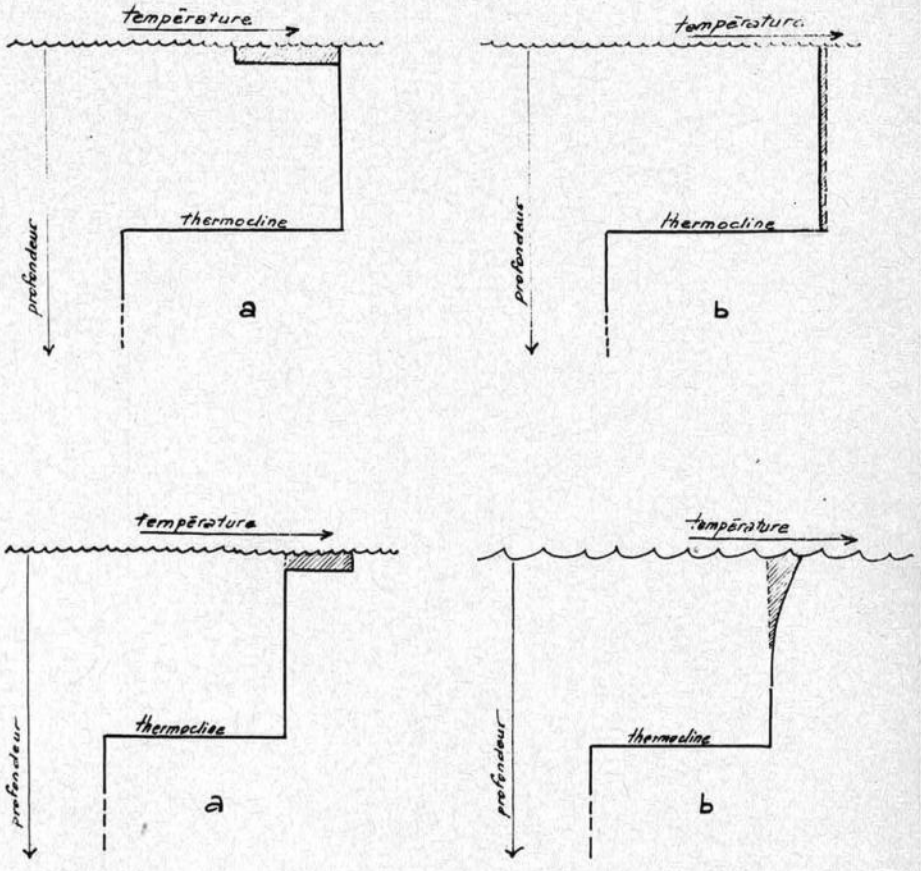
La « couche limite »

L'atmosphère « libre », telle qu'elle est simulée par les modèles, est séparée de la surface océanique par une *couche limite de turbulence* de plusieurs centaines de mètres. Nous savons mal comment le flux thermique traverse cette couche avant d'atteindre l'atmosphère libre. Nous devons nous contenter d'une formulation très grossière du flux thermique effectif : on admet que ce flux ne dépend que de la vitesse du vent et de la température de l'air à 1 500 m, et de la température superficielle de la mer supposée constante jusqu'à l'échéance de la prévision.

En réalité, cette température ne reste pas constante. D'un jour à l'autre, sa variation dépasse souvent 1 °C. Quoique relativement faible, une telle variation peut modifier du tout au tout la valeur du flux thermique. En particulier, il est loin d'être indifférent que la mer

Dans le cas où le bilan thermique de la mer est négatif, la couche d'eau superficielle située immédiatement au-dessous de la surface libre, tend à se refroidir (a) ; de ce fait, sa densité augmente. Elle acquiert ainsi un mouvement vertical vers le bas. Le brassage qui en découle assure l'homogénéisation des températures au-dessus de la thermocline.

Dans le cas où le bilan thermique de la mer est positif, la couche d'eau superficielle située au contact de l'air tend à se réchauffer et devient donc plus légère. En l'absence de vent et de vagues, cette eau superficielle flottera longtemps (a) au-dessus de l'eau plus dense, avant de se mélanger. En présence de vent et de vagues (b) la turbulence active le mélange.



soit légèrement plus chaude que l'atmosphère où l'inverse. Or, l'évolution propre de la température superficielle de la mer est liée à des processus très complexes qui affectent la *troposphère océanique*, couche superficielle chaude d'épaisseur variable, de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres.

De manière précise, l'évolution de la température marine superficielle en un point donné dépend :

du bilan thermique des couches d'eau superficielles, c'est-à-dire :

— de la chaleur reçue du soleil sous forme de radiations visibles ;

— de la chaleur perdue par rayonnement infrarouge ;

— de la chaleur sensible, fournie à l'atmosphère ;

— de la chaleur latente, également fournie à l'atmosphère ;

des mouvements de convection, susceptibles d'atténuer le refroidissement superficiel de la mer, en cas de bilan thermique négatif ;

de la turbulence créée par les vagues, susceptible d'atténuer le réchauffement superficiel de la mer dans le cas d'un bilan thermique positif ;

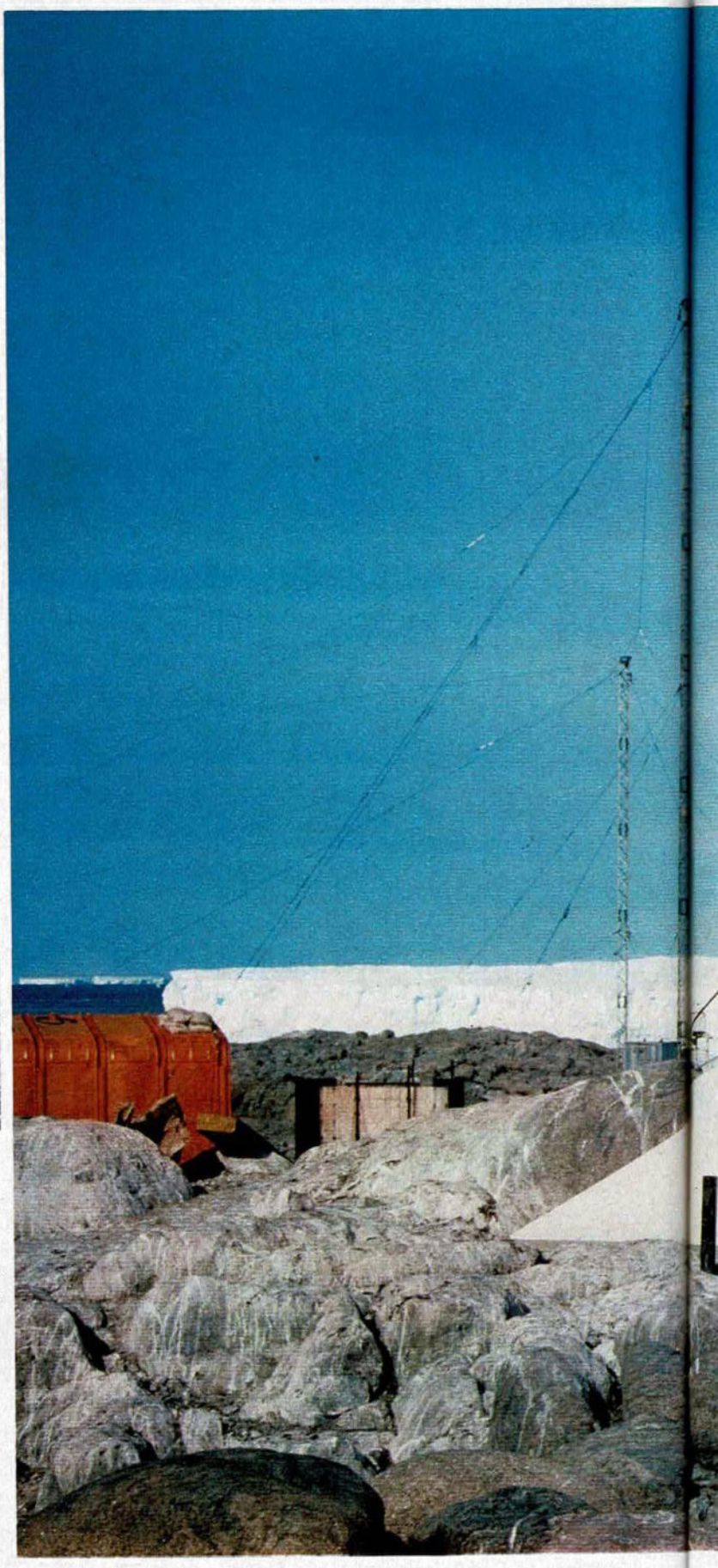
de la vitesse et de la direction du courant local, susceptibles de remplacer la masse d'eau locale par une masse d'eau de température différente. Dans certains cas, la structure de ces courants superficiels peut entraîner des appels d'eau froide profonde (« upwelling »).

La turbulence en surface et les courants locaux constituent l'essentiel de la réaction de l'atmosphère sur la mer : l'énergie thermique de cette dernière, transformée en énergie mécanique sous forme de vent, produit les vagues et les courants qui conditionnent l'évolution thermique de la troposphère océanique. Plusieurs modèles numériques plus ou moins simplifiés sont actuellement proposés pour schématiser la troposphère océanique et, du même coup, prévoir l'évolution de la température marine superficielle. Ces modèles pourraient préciser l'évolution de la température superficielle à partir des prévisions météorologiques (vent et nébulosité notamment), prévisions qui, nous l'avons vu plus haut, nécessitent précisément la prévision des températures superficielles... On arrive ainsi à la conception de *modèles numériques couplés* d'atmosphère libre, de troposphère océanique, et de couche limite turbulente.

Un ensemble de tels modèles couplés serait bien plus réaliste que le seul modèle d'atmosphère libre dont, en réalité, les résultats perdent toute signification au-delà de plusieurs jours.

UNE BATTERIE D'APPAREILS DE MESURE DU RAYONNEMENT (SOLAIRE, ETC.) IMPLANTEE AU GROENLAND, POUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DE LA « BALANCE RADIATIVE » TERRESTRE.

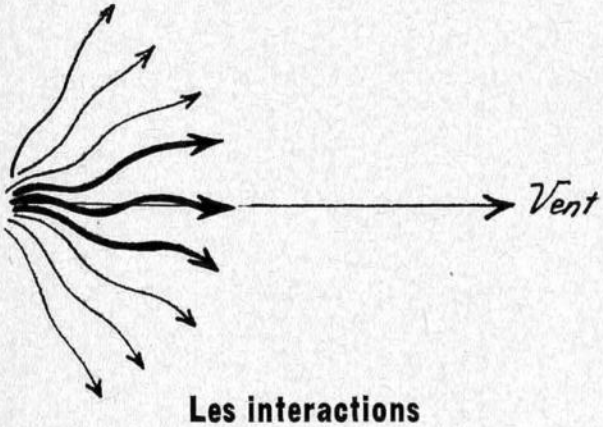
EN TERRE ADELIE, CETTE STRUCTURE ABRITE LE RADAR DE POURSUITE POUR L'ETABLISSEMENT DES « VECTEURS VENTS », D'APRES LES COORDONNEES DES RADIOSONDES EMPORTEES PAR BALLONS.



Expéditions polaires françaises

J. P. Bonnin

En surface, le vent engendre des vagues de part et d'autre de sa direction ; l'écart angulaire maximum est, pratiquement, de l'ordre de soixante degrés.



Les interactions

En attendant la mise au point de tels modèles, la méthode empirique est seule utilisable. De nombreux exemples d'interactions ont été mis en évidence au cours des dernières années, qui constituent autant de règles pratiques de prévision à moyenne échéance. C'est ainsi que, sur la côte des U.S.A., les pluies et les stratus sont plus fréquents lorsque l'eau superficielle du large, plus froide qu'à l'accoutumée, a rafraîchi le vent du large.

De même, l'été inhabituel de 1968 aux Iles britanniques a été accompagné d'une très vaste zone d'anomalie négative de la température superficielle sur l'Atlantique Nord.

Un exemple complexe d'interaction nous est fourni, lorsque la température des eaux du Gulf Stream vient à s'élever de 1 ou 2 degrés. Il s'ensuit un renforcement des vents d'ouest sur l'Atlantique Nord, puis un abaissement de la température des eaux des courants froids du Groenland et des Canaries.

Les interactions ne sont d'ailleurs pas limitées à un seul hémisphère. C'est ainsi qu'un affaiblissement des alizés du Sud-Sud-Est dans la partie orientale du Pacifique Sud entraîne, dans un premier stade, une anomalie positive de la température des eaux du courant froid de Humboldt, qui longe les côtes du Chili et du Pérou, et d'une vaste zone équatoriale entre les Tuamotou et la côte sud-américaine.

Dans une seconde phase, on observe un renforcement des vents d'Ouest sur la partie orientale du Pacifique Nord, accompagné de la formation d'un minimum barométrique au sud de l'Alaska, puis d'un accroissement de la pression atmosphérique au sud du Groenland, enfin d'une diminution de cette dernière au nord de l'Europe.

La recherche systématique de telles corrélations n'est encore qu'à ses débuts. Elle devrait aboutir à une méthode empirique globale de prévision à moyenne échéance.

L'état de la mer

Alors que l'action des océans sur l'atmosphère est de nature thermique, l'action de l'atmosphère sur les océans est essentiellement mécanique.

Les vents engendrent les grands courants océaniques, dont on connaît depuis longtemps l'influence prédominante sur les climats du globe. Ils engendrent aussi les vagues, dont nous avons mentionné le rôle dans la diffusion de la chaleur. Le calcul et la prévision des vagues constituent l'une des attributions d'un service météorologique.

Les processus de formation des vagues sont très complexes. Tout d'abord, les fluctuations de pression superficielle, liées à la turbulence du vent, impriment en quelque sorte leur image sur la surface libre de la mer. Les premières vagues formées réagissent à leur tour sur l'écoulement de l'air dont elles « pompent » l'énergie.

Dans la nature, le vent reste rarement constant dans l'espace et le temps. Le calcul numérique des vagues nécessite d'abord la connaissance des champs de vents successifs de l'océan : ceux qui ont été effectivement observés les trois derniers jours et ceux qui sont prévus à 24 ou 48 heures d'échéance.

Dans le cas de l'Atlantique Nord, la surface est divisée en un millier de mailles carrées et, pour chacune de ces mailles, on calcule le bilan d'énergie d'une centaine de « composantes représentatives ». Dans ce bilan interviennent :

— l'énergie apportée par le vent local ;
— l'énergie apportée par propagation ;
— l'énergie dissipée par turbulence ;
— l'énergie échangée avec les autres composantes.

Les différents modèles que l'on peut établir à partir de telles données ne font pas, toutefois, intervenir la couche-limite turbulente, que nous connaissons bien mal.

Cette lacune, entre autres, fait que la météorologie n'est pas encore une science exacte...

J. ROMER - R. GELCI

L'ASSISTANCE MÉTÉOROLOGIQUE

Il est toujours risqué, même lorsqu'il s'agit d'une activité où la prévision est chose courante, de supputer des évolutions à long terme. En ce qui concerne l'avenir de l'assistance météorologique, il est relativement aisé de dégager l'ébauche de son développement, mais il ne saurait être question de préciser les modalités ou les échéances des réalisations. Dans ce domaine, en effet, interviennent de nombreux facteurs et des impératifs économiques à grande échelle et des choix politiques risquent toujours de prendre le pas sur les seules considérations techniques.

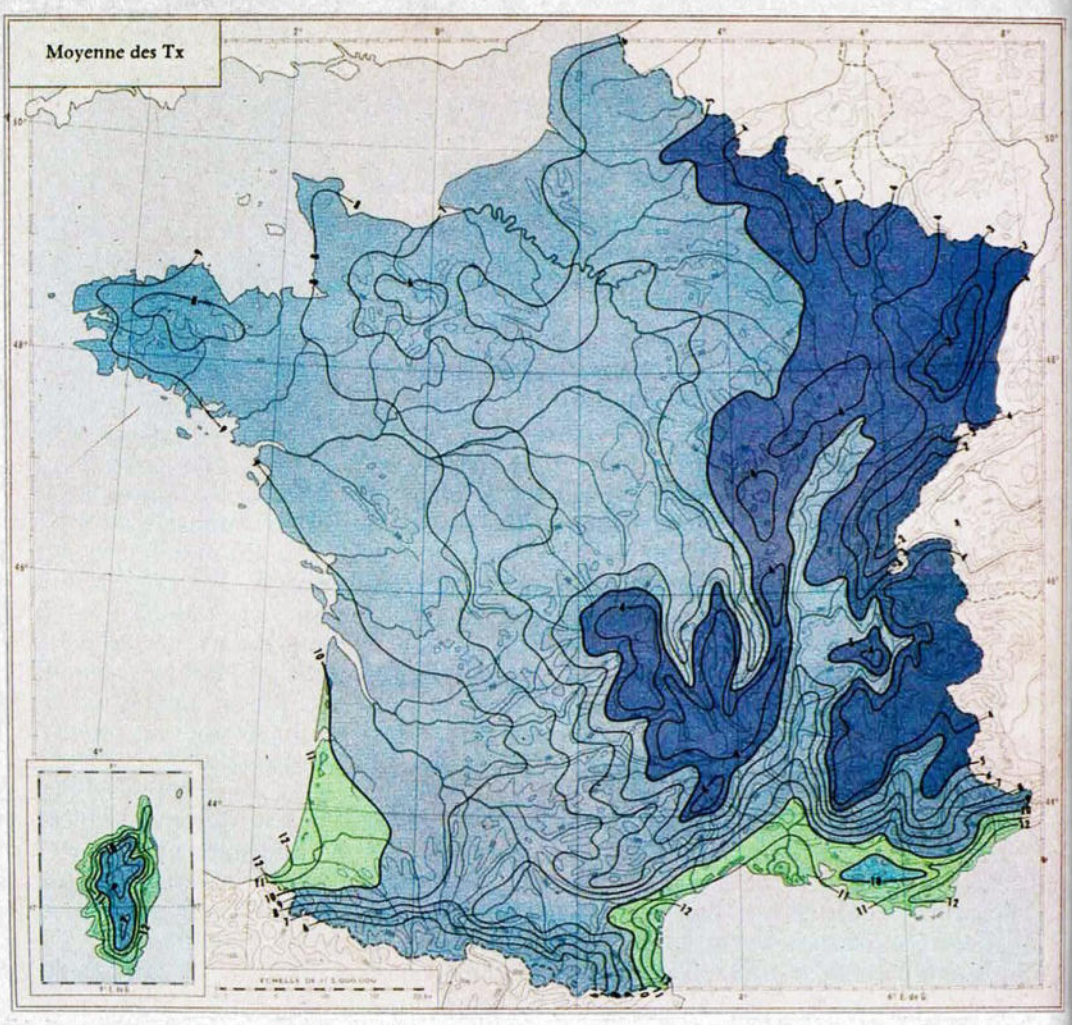
Quelles que soient, d'ailleurs, les modalités de cette évolution, il nous paraît évident que l'assistance météorologique touchera peu à peu pratiquement toutes les activités humaines. Bien que l'homme, en effet, apprenne à se protéger de plus en plus efficacement des intempéries, il lui sera nécessaire, pour de simples considérations de confort, d'efficacité et de rentabilité, de tenir compte, tant dans sa vie professionnelle que dans sa vie privée ou ses loisirs, des facteurs météorologiques qui affectent ce que l'on appelle son « environnement ».

La notion même d'« environnement » évolue d'ailleurs rapidement. Les progrès des diverses branches de la Science mettent en évidence l'interpénétration des diverses disciplines et on ne sait plus très bien où se situe la limite qui sépare la Météorologie de l'Astrophysique. De même, on insiste de plus en plus sur les liens unissant l'Océanographie et la Météorologie. Le cycle de l'eau fait d'ailleurs appel aussi bien à l'Hydrologie qu'à la Météorologie, et, bien que l'on sache encore peu de choses des relations entre les phénomènes météorologiques et les variations des champs magnétique et électrique terrestres, il est chaque jour plus évident que l'on ne saurait, sans arbitraire, séparer Météorologie et Géophysique. En bref, la Météorologie est devenue une « science carrefour ». Déjà dans les grands services des pays étrangers, dans les organisations internationales, une évolution se fait sentir. Les U.S.A. ont transformé leur Service Météorologique en une « Agence des Sciences de l'Environnement » (ESSA) dont il est question d'agrandir encore le domaine d'action. En U.R.S.S., le Service d'Hydrométéorologie, qui dépend directement de la Présidence du Conseil, se rapproche de l'Océanographie et de la Géophysique. L'Organisation Météorologique Mondiale resserre ses liens avec le Conseil Océanographique et l'Union Géophysique et Géodésique Internationale. Bref, il nous paraît probable qu'avant longtemps un puissant service scientifique se développera, en France comme ailleurs, pour traiter de tous les problèmes qui touchent à la physique de notre globe au sens le plus large. Cet élargissement des responsabilités et des possibilités d'action des météorologistes pose évidemment de multiples problèmes à propos desquels nous nous bornerons à exposer quelques idées-force qui devraient guider l'évolution de l'assistance météorologique.

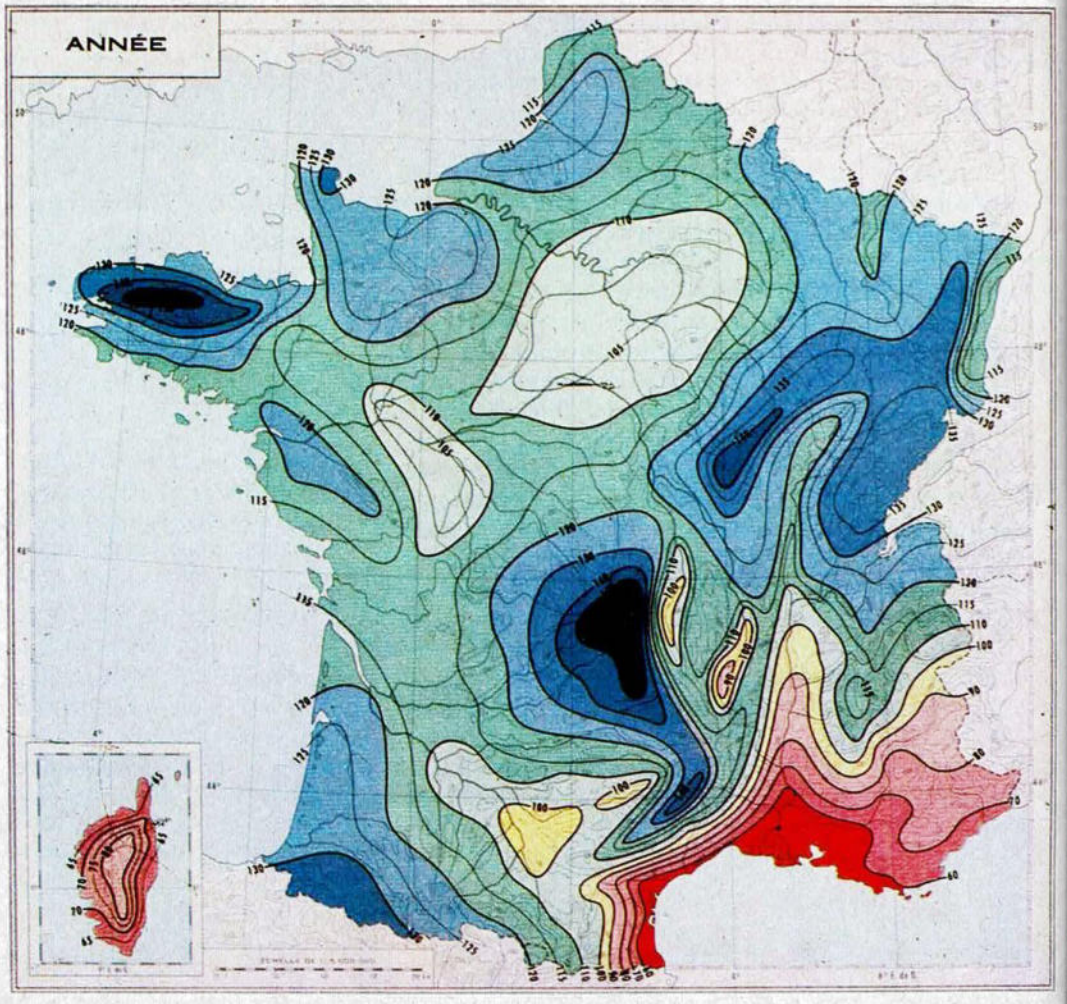
L'élaboration de renseignements météorologiques — même limitée à l'échelle d'un pays — nécessite un travail de base considérable. Elle implique d'abord la collecte permanente d'un nombre colossal de données sur de très vastes espaces, puis leur exploitation soit en temps réel, aux fins de la prévision, soit de façon plus classique, aux fins de la climatologie. Ceci ne peut se faire qu'à l'aide de calculateurs très puissants, dotés de mémoires anormalement importantes et d'un « software » particulièrement élaboré. Pour cela, des équipes hautement spécialisées sont nécessaires. L'ensemble est extrêmement onéreux, surtout à l'échelon purement national. Aussi la mise en pool international est-elle envisagée de plus en plus sérieusement.

Les tâches relevant de l'assistance météorologique ou, pour être plus précis, de l'aide que l'utilisation optimale des informations météorologiques peut apporter à la collectivité, comportent, selon leur objet, des aspects bien différents.

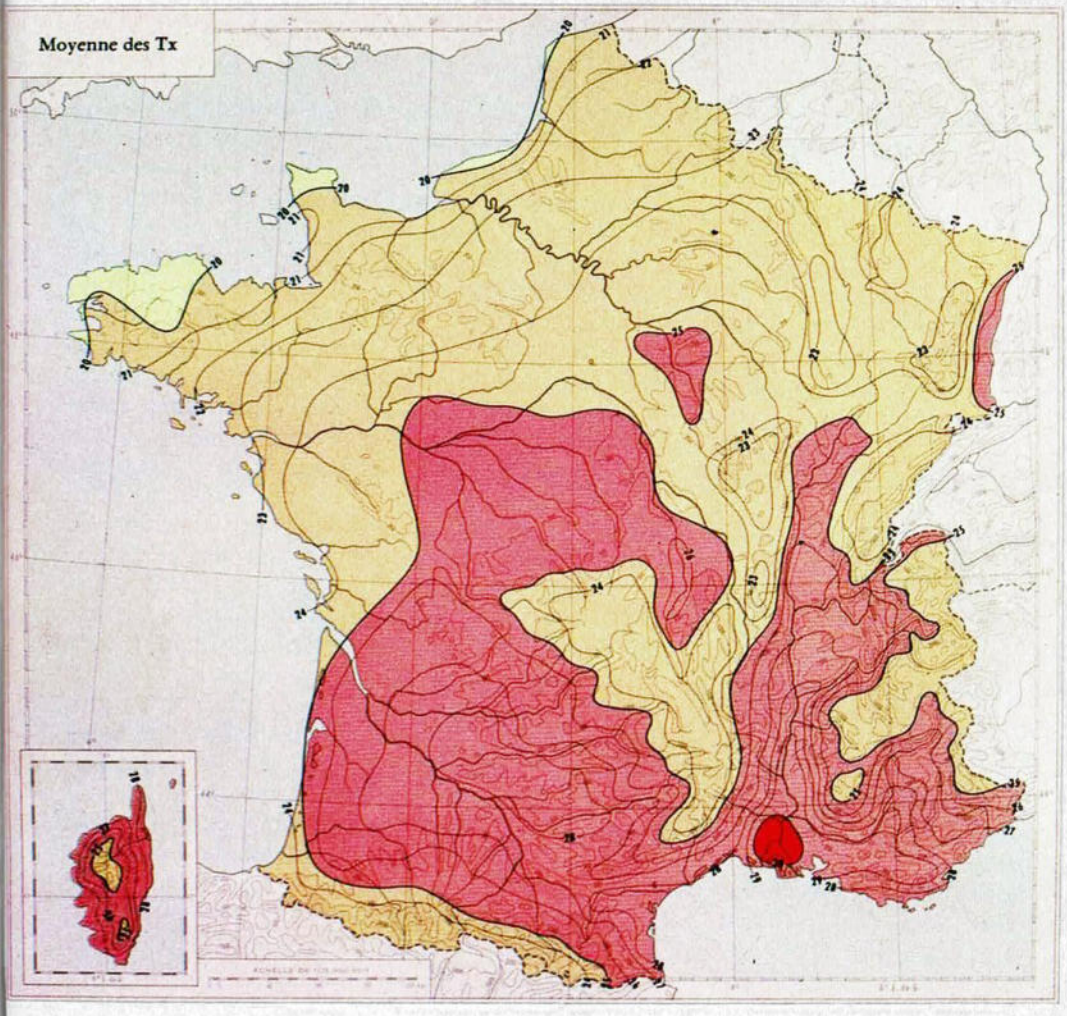
En ce qui concerne les études de caractère fondamental, celles-ci sont appelées à se multiplier et le domaine qu'elles couvrent à se diversifier. Les facteurs météorologiques touchent en effet des domaines très variés, souvent mal connus des intéressés. On peut en citer quelques-uns qui nous paraissent se prêter à de grands développements :



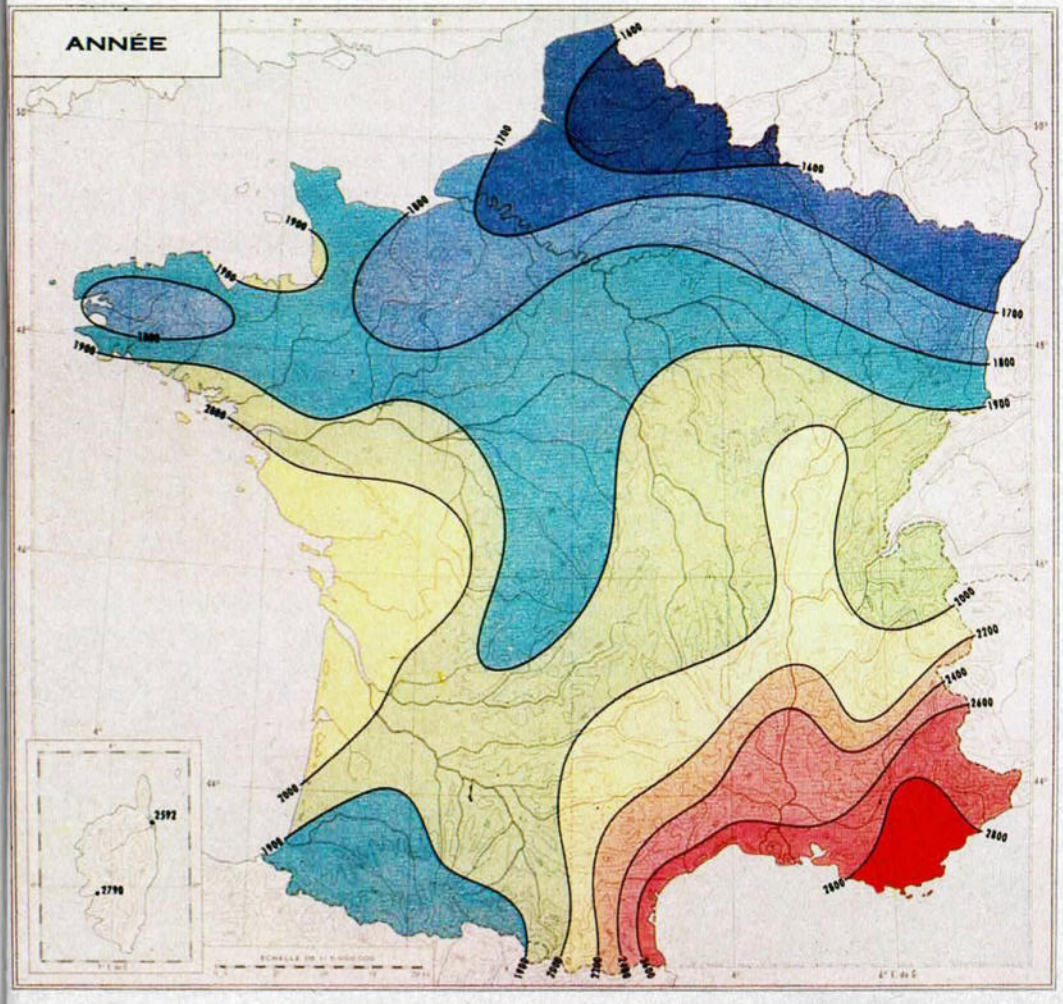
LES MAXIMUMS DE JANVIER : LE CARACTERE « CONTINENTAL », QUI PEUT ETRE ASSOCIE, SELON LES REGIONS, AU CLIMAT DE MONTAGNE, DETERMINE POUR JANVIER LES TEMPERATURES MAXIMUMS LES PLUS BASSES DE FRANCE.



LES JOURS DE PLUIE ANNUELS : LES REGIONS LES PLUS DIRECTEMENT SOUMISES AUX INFLUENCES OCEANIQUES DE NORD-OUEST SONT LES PREMIERES INTERESSEES, MAIS AUSSI LES VERSANTS EXPOSES AU VENT DES MASSIFS MONTAGNEUX.



LES MAXIMUMS DE JUILLET : EN JUILLET, LE JEU DES INFLUENCES OCEANIQUES, LE CARACTERE PLUS OU MOINS MERIDIONAL ET L'ALTITUDE SONT GRANDEMENT RESPONSABLES DE LA REPARTITION DES TEMPERATURES MAXIMALES.



LES JOURS D'ENSOLEILLEMENT : SUR CETTE CARTE, LES « BRUMES DU NORD » SEMBLENT ETRE VISUALISEES. LE MIDI MEDITERRANEEN, AU CONTRAIRE, NE DEMENT PAS SA REPUTATION. L'ENSOLEILLEMENT BAT TOUS LES RECORDS DANS LA REGION EST DE TOULON.

Urbanisme et aménagement du territoire : Problèmes d'exposition, d'insolation, de température, de pluviosité (en liaison avec le système d'évacuation des eaux), de pollution, etc. Notons à cet égard qu'une véritable Météorologie Urbaine est en cours d'expansion.
Transports et Tourisme : Influence des facteurs météorologiques sur l'organisation, l'exploitation et le rendement des réseaux routiers, ferroviaires ou maritimes (sans oublier les aéroglisseurs). Prise en compte des facteurs climatiques dans la mise au point des plans indispensables au développement de la Civilisation des loisirs.
Hydrologie : Participation de la météorologie à la politique d'utilisation des eaux, dont, on le sait, la pénurie et la pollution menacent gravement les régions fortement peuplées et industrialisées. Ceci devrait déboucher sur la mise au point de techniques de pluie provoquée et sur leur mise en œuvre.
Biométéorologie : Etude de l'influence des paramètres météorologiques sur tous les phénomènes de la vie, et en particulier de la vie humaine.
La fourniture de *renseignements climatologiques* constitue une activité en rapide développement. Le nombre des usagers à cet égard est déjà considérable en France et s'accroît d'année en année. Cet accroissement pose d'ores et déjà un problème, car il occupe une part appréciable du temps et des moyens des services météorologiques. Le développement des bureaux climatologiques régionaux a aidé dans une certaine mesure à pallier ces difficultés. La diffusion de bulletins départementaux, souvent avec l'aide des autorités préfectorales, a permis également de satisfaire une partie de la clientèle. Mais il devient indispensable de perfectionner l'équipement des services de climatologie, afin de fournir à tous les intéressés, dans des délais acceptables, les renseignements dont ils ont besoin. L'automatisation du traitement des données, en cours au Service Central, va certainement accroître très sensiblement les possibilités actuelles tout en diminuant considérablement le temps nécessaire à l'élaboration des statistiques. Dans un stade ultérieur, le rattachement des centres régionaux au calculateur central facilitera la diffusion des informations et permettra de satisfaire dans de meilleures conditions la clientèle locale.
Pour le grand public, qui juge essentiellement à travers la Presse et la Radio, la fourniture des prévisions météorologiques est le rôle essentiel de la Météorologie. Les services intéressés sont dans l'obligation de prévoir l'évolution de phénomènes multiples et complexes, variables dans les quatre dimensions, et sur lesquels on ne dispose d'aucune possibilité d'action. Cette situation inconfortable, et probablement unique parmi les disciplines scientifiques, s'aggrave de la difficulté de connaître l'état présent de l'atmosphère à l'échelle du globe, et de la complexité des équations qui traduisent les lois de la physique atmosphérique. C'est seulement au cours des dernières années que des progrès sensibles ont été accomplis dans ces deux directions ; les satellites météorologiques permettent en effet une vision d'ensemble des formations nuageuses et de leur évolution ; les puissants calculateurs de la dernière génération peuvent prendre en compte un nombre très élevé de données et les traiter en temps réel à travers la longue suite de calculs qui permet l'élaboration des prévisions. Les progrès sont lents, mais constants, et ils bénéficient au premier chef aux usagers des prévisions. Il faut tout de même se garder de se réjouir trop vite et regarder les choses de plus près, en différenciant les échéances de prévisions. On peut estimer que les méthodes utilisées actuellement sont susceptibles de donner satisfaction jusqu'à cinq jours d'échéance, avec une précision qui s'améliore sans cesse. Au-delà, les résultats deviennent aléatoires et il n'est pas sûr que les méthodes actuelles soient totalement valables. Beaucoup reste à faire dans ce domaine. Quoi qu'il en soit, il est facile d'imaginer les conséquences que pourrait avoir, sur toutes les branches de l'activité humaine, une connaissance précise du temps, même limitée aux cinq jours à venir.
Il faut cependant insister sur le fait que les gains acquis dans la précision rendent de plus en plus nécessaire la spécialisation des prévisions. Dans un pays comme la France, à l'orographie complexe, carrefour d'influences climatiques (océaniques, méditerranéennes et continentales) où les évolutions sont souvent brutales, il est pratiquement impossible de schématiser de façon claire, dans un texte de quelques lignes, le temps sur l'ensemble du pays pour une période dépassant 24 heures.
Par contre, c'est en adaptant les prévisions aux besoins des diverses catégories d'usagers que les météorologistes rendront les services les plus importants. Mais cela pose un nouveau problème, qui est la difficulté de toucher tous les intéressés.
Un cas particulier nous paraît justifier quelques commentaires : il s'agit de la prévision à court terme des phénomènes dangereux. Il est certainement important de pouvoir signaler à l'ensemble de la population l'approche d'un fort orage, en précisant l'horaire de son déplacement, son intensité et son évolution à court terme. L'utilisation rationnelle des radars de surveillance donnera dans un proche avenir les moyens d'assurer une couverture perma-

nente sur l'ensemble du pays. Mais, là encore, il restera à mettre au point les moyens de diffusion.

A plus long terme, c'est vers la modification du temps que s'orientera l'activité des météorologistes. Il y a une dizaine d'années, une enquête américaine des plus sérieuses indiquait que la maîtrise des techniques nécessaires serait atteinte vers la fin de ce siècle. Les problèmes scientifiques à résoudre seront peut être moins délicats que les problèmes économiques, ou politiques. Les activités humaines dépendent de façon assez variable des facteurs météorologiques, et tel réclamera des précipitations pour ses cultures, alors que tel autre souhaitera le soleil pour ses loisirs.

Ainsi, tout nous permet de penser que les météorologistes de demain auront à affronter autant de problèmes que ceux qu'ils ont à résoudre actuellement. Ce ne seront pas les mêmes mais rien n'assure qu'ils seront plus faciles.

Pierre DUVERGÉ

LA MÉTÉOROLOGIE ET LE GRAND PUBLIC

Si les responsables des très nombreuses activités tributaires des conditions atmosphériques consultent régulièrement les bulletins spécialement adaptés à leurs besoins et qui leur sont transmis chaque jour, une part importante du grand public est obligée de glaner elle-même les informations météorologiques qui peuvent lui être utiles, soit dans le journal, soit en écoutant le bulletin radiodiffusé, soit en regardant le bulletin télévisé. Il en va ainsi de tous les sédentaires, des artisans, des travailleurs indépendants, des touristes qui s'intéressent au temps qu'il fera pour déterminer leur tenue vestimentaire, régler l'intensité du chauffage pour la nuit, décider de l'opportunité d'un déplacement ou, tout simplement, pour pouvoir, en meilleure connaissance de cause, parler du temps...

Certaines de ces applications peuvent paraître futiles ; d'autres le sont moins, car les conditions météorologiques peuvent présenter, même pour l'individu isolé, de sérieux inconvénients, voire entraîner de réels dangers. Ainsi le nombre d'accidents de voitures évités chaque hiver par la simple annonce de brouillard ou de verglas est certainement très important.

Cependant, les modes d'information « omnibus » employés pour renseigner la majorité des usagers non organisés et dispersés sur tout le territoire, présentent une certain nombre d'inconvénients qui sont à la base de bien des malentendus.

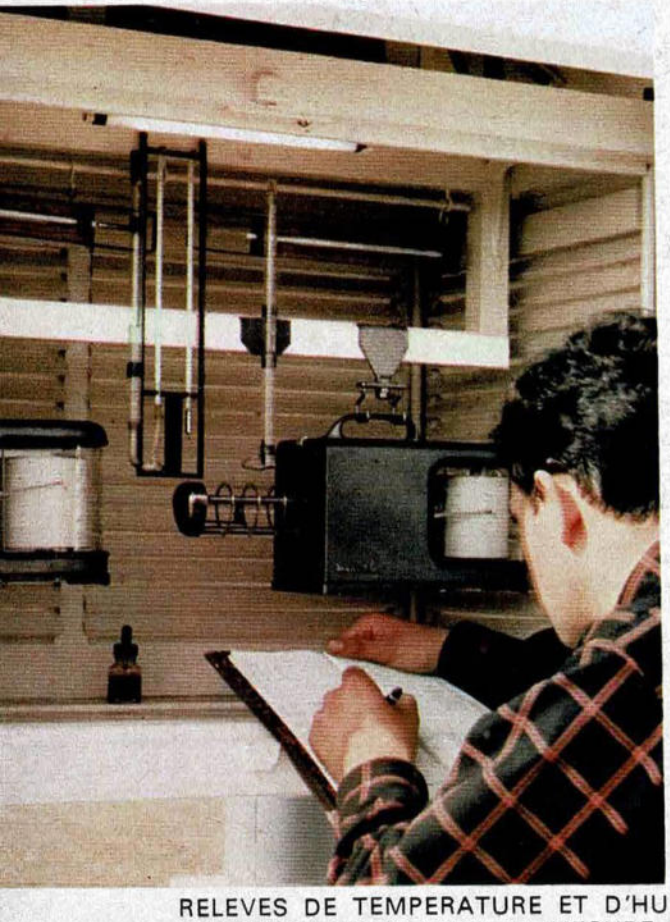
Agence TASS

Des renseignements météorologiques diffusés par haut-parleur, un thermomètre géant... un curieux exemple d'assistance « grand public », en U.R.S.S.

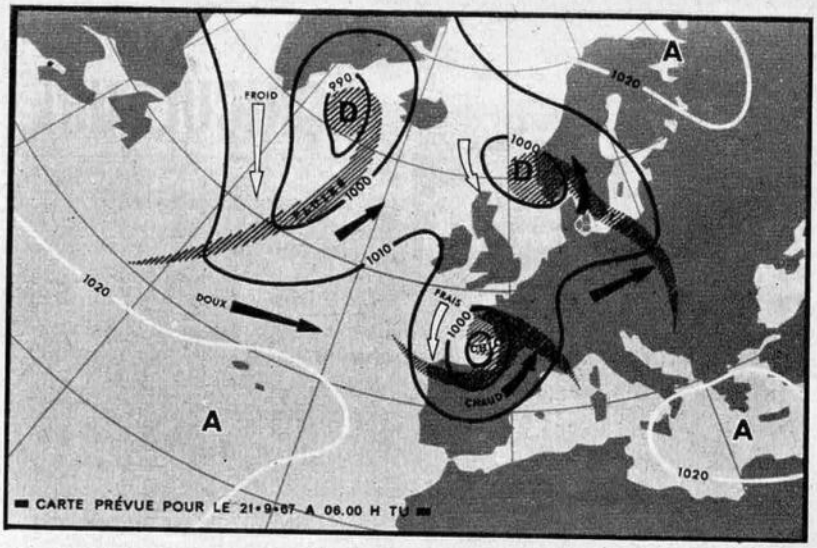
Presse écrite et radio

Dans le cas de la presse écrite, qui prend de façon assez générale ses informations à la bonne source (à l'exception des « prévisions à long ou très long terme », qui n'émanent pas des services de la Météorologie Nationale), la difficulté réside dans les délais qui séparent l'élaboration de la prévision du moment où celle-ci est livrée au lecteur. Cela est particulièrement sensible pour les quotidiens du matin qui présentent des prévisions élaborées à l'aide des renseignements de la veille à 13 h. Etant donné la grande variabilité des phénomènes atmosphériques, il y a évidemment intérêt à disposer des toutes dernières informations.

DEUX EXEMPLES D'OBSERVATIONS AU SOL : LA MESURE PRECISE DE LA DIRECTION DU VENT ET LA MESURE DE LA TEMPERATURE A L'INTERIEUR DU SOL.



RELEVES DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE (D'APRES LES INDICATIONS DES APPAREILS SOUS ABRI) ET MESURE DES PRECIPITATIONS AU PLUVIOMETRE.



Un exemple de document des bulletins télévisés : la carte « situation générale prévue », où est porté le déplacement des perturbations dans la zone intéressant l'Europe occidentale.

Entre 13 h la veille et 8 ou 9 h le jour de la lecture du quotidien, les météorologistes ont disposé de cartes de 19 h, puis de 1 h et même de 4 h du matin. Ceci leur permet, dans les bulletins radiodiffusés le matin, de serrer de plus près le problème en tenant compte des imprévus de la nuit. Le lecteur, par contre, n'a connaissance que d'une information déjà ancienne et, par suite, plus précaire.

Les prévisions calculées, dont il est question par ailleurs, permettront sans doute une amélioration de cet état de choses en offrant une marge d'incertitude plus faible et en portant, par suite, l'échéance des prévisions à plus de 24 heures. La prévision écrite, même diffusée avec un certain retard, sera améliorée d'autant.

En ce qui concerne les bulletins météorologiques radiodiffusés, il convient d'ailleurs de n'attribuer au service officiel de la Météorologie que ceux transmis par l'O.R.T.F. et par Radio Monte-Carlo. Encore relève-t-on, dans leur réception, des causes courantes de malentendus : l'écoute distraite qui fait confondre les régions de beau temps ou de pluie, ou le commentaire abusif du présentateur qui croit apporter une précision et déforme parfois l'idée exprimée.

Ces bulletins omnibus ont surtout l'inconvénient de ne pas réserver la vedette à l'élément essentiel pour chaque auditeur. Ils ne présentent pas avec suffisamment de précision tel caractère particulier, primordial pour lui, comme le ferait un bulletin à lui seul destiné. C'est pourquoi les bénéficiaires des bulletins spéciaux, dont il est question par ailleurs, se déclarent bien plus souvent satisfaits de la Météorologie que le grand public.

Les bulletins radiodiffusés à l'intention du grand public sont diffusés par France-Culture, pour l'ensemble du territoire, à 12 h 35, 19 h 15 (en semaine), 19 h 45 (le dimanche) et 23 h 58 ; des résumés, également valables pour l'ensemble de la France, sont diffusés par France-Inter (grandes ondes) à 6 h 59, 7 h 59 (semaine seulement), 11 h 59, 19 h 59.

Sur le plan régional, des émissions plus détaillées sont assurées par les divers émetteurs régionaux de l'O.R.T.F. à 7 h 30, 12 h 30, 19 h 15 (19 h 30, le dimanche).

Les bulletins télévisés

Les bulletins télévisés généraux sont diffusés sur la 1re chaîne à 19 h 20 ; les émetteurs régionaux diffusent des bulletins plus restreints dans la tranche réservée aux informations régionales.

Les bulletins télévisés nationaux donnent une vue de la situation générale prévue pour le lendemain. On peut ainsi, d'un seul coup d'œil, y voir les grands courants de vent et les perturbations qui menacent. Très souvent, une vue de la couverture nuageuse, reçue des satellites météorologiques, complète cette information. Une prévision de l'état du ciel (nébulosité et précipitations pour le lendemain avec l'évolution au cours de la journée), est donnée sous forme animée. Le bulletin énonce, en outre, les températures relevées dans un certain nombre de villes (France et pays limitrophes) le jour même à 13 h.

Il est à remarquer que ces bulletins présentent en 90 secondes une série d'informations particulièrement dense. Ce temps d'antenne serait utilement doublé pour permettre une meilleure compréhension.

Signalons enfin que des répondeurs téléphoniques fournissent automatiquement, sur simple appel, le texte du dernier bulletin rédigé. Pour Paris et l'Ile-de-France, le numéro d'appel est 705.97.39. Pour avoir un renseignement précis nécessaire à la solution d'un problème important, il est toujours possible d'appeler le centre ou la station météorologique la plus proche.

L'usage de ces « consultations » météorologiques téléphoniques ne peut malheureusement pas être systématique sous peine de voir les ingénieurs débordés par les demandes.

Roger CLAUSSE

AGRICULTURE

Si la plupart des activités humaines sont soumises aux aléas climatiques, peu en subissent les effets d'une façon aussi déterminante que l'agriculture.

Qu'une conjugaison favorable se produise : ensoleillement, chaleur, apport hydrique, et l'on assiste à des rendements records. Inversement, qu'une anomalie climatique se manifeste, grêle, gel ou sécheresse, et à l'échelon régional, voire national, toute une récolte peut être compromise.

Ces à-coups dans le niveau quantitatif ou qualitatif de la production se révèlent particulièrement graves lorsqu'un stockage tampon ne peut être envisagé. Pour certaines cultures, comme les céréales, on peut compter sur une compensation d'une saison à l'autre. Il n'en est pas de même pour les fruits ou les légumes. La science agronomique cherche bien, par sélection génétique, à adapter le matériel biologique aux contraintes climatiques les plus courantes, mais l'ajustement au climat ne peut être qu'approché, les circonstances atmosphériques étant loin de présenter un cycle régulier au long des saisons. Leur variabilité interannuelle est au contraire frappante, surtout aux latitudes tempérées, siège d'un conflit quasi permanent entre masses d'air froid polaire et poussées chaudes d'origine océanique.

Même si le temps dans son ensemble répond aux exigences écologiques d'une culture, des événements fortuits peuvent réduire à néant en quelques heures ou en quelques minutes les espérances de récolte. Combien de vergers en plein rendement sont, chaque année, ravagés par une gelée nocturne intempestive ? Un coup de vent, lié par exemple au passage d'un orage, peut abattre toute une récolte de poires quelques jours avant la cueillette. Tous les ans, la presse se fait l'écho des ravages provoqués par la grêle qui ne laisse que des moignons de végétaux déchiquetés.

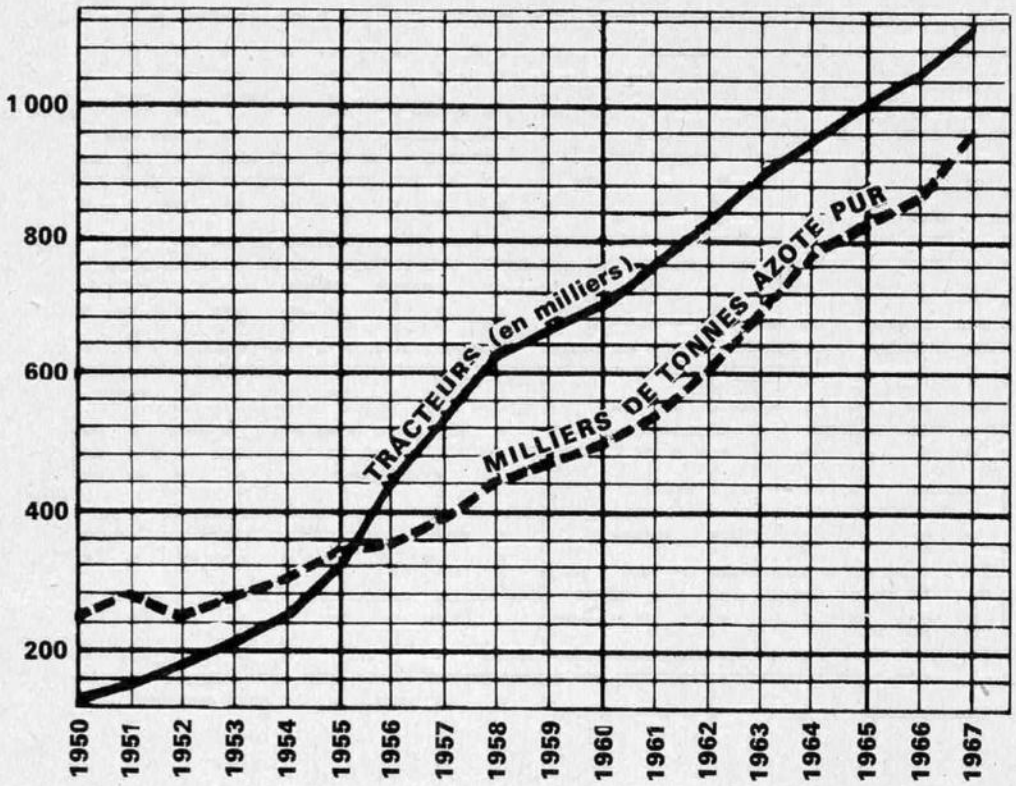
La nocivité des ennemis biologiques des cultures, faune ou flore, est aussi étroitement liée au temps. Lorsque celui-ci favorise à la fois la réceptivité de la plante hôte et la prolifération de l'agent pathogène ou déprédateur, on peut assister à des attaques explosives aux conséquences irrémédiables. Certaines invasions de criquets pèlerins au Maroc, le mildiou de la pomme de terre en Irlande au XIX^{e} siècle, ou, plus près de nous, l'extension du phylloxéra en France, vers les années 1880, sont des exemples classiques.

Des incidences économiques facilement explicables

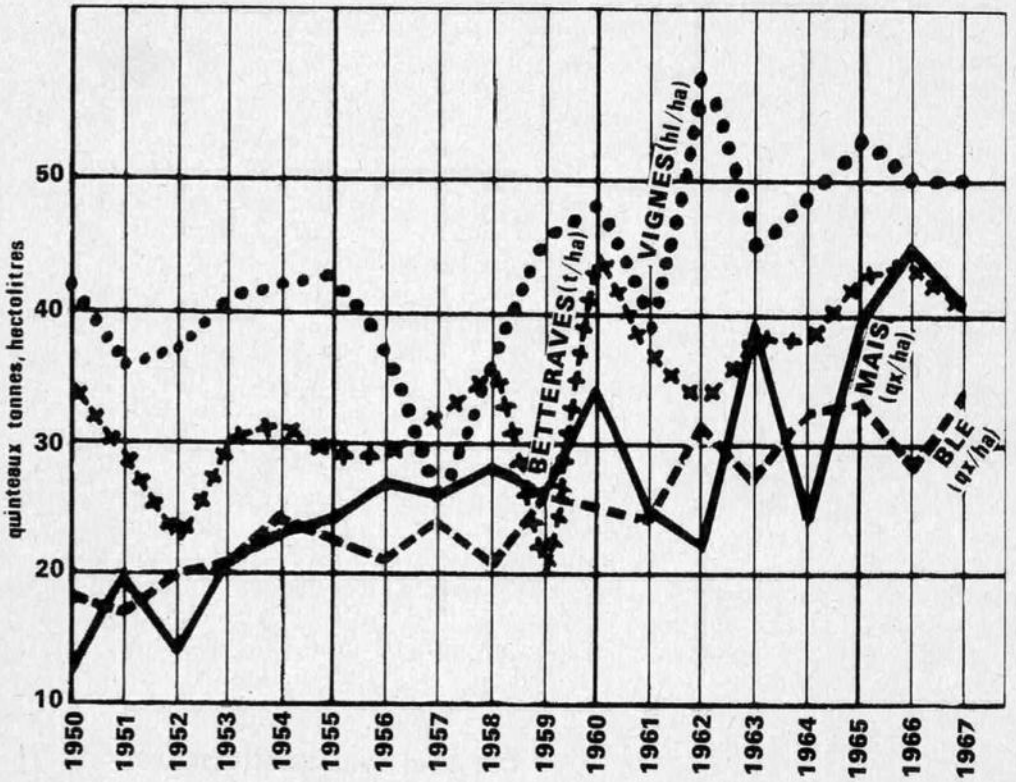
Les incidences économiques de la variabilité climatique sont délicates à estimer du fait que l'on ne sait déterminer avec précision le potentiel productif des cultures et que de nombreux facteurs interviennent conjointement : évolution des techniques culturales, perfectionnement et adaptation des matériels, rationalisation des entreprises. Elles apparaissent cependant lorsque l'on met en parallèle, d'une part la progressione régulière soit de l'équipement du pays en tracteurs, soit de l'utilisation des engrais azotés, soit de la productivité moyenne, et d'autre part les rendements effectifs de nos principales cultures dont la variabilité interannuelle est frappante, comme le montrent les courbes de la page 115. Encore s'agit-il de statistiques officielles globales qui ne tiennent pas compte de compensations possibles entre régions aussi différentes, par exemple, que le Roussillon et la vallée de la Loire. Mais certaines années ne se révèlent pas moins sensiblement déficitaires : 1959 pour la betterave, 1964 pour le maïs, et l'on doit bien admettre que le principal responsable de ces accidents est le temps.

Il serait utile de chiffrer, au moins approximativement, les pertes imputables aux circonstances météorologiques afin de pouvoir fixer la limite des dépenses que l'on peut raisonnablement envisager pour en atténuer les conséquences fâcheuses. Il est bien difficile d'apporter une réponse objective et complète. Dans une étude publiée en 1965, le Département américain de l'Environnement avançait des pertes annuelles moyennes, sur le territoire des Etats-Unis, s'élevant à 5 % de la valeur de la production agricole, soit 2 milliards de dollars. Le professeur Masson, ancien directeur des services météorologiques britanniques, a publié, pour son propre pays, des chiffres proportionnellement très voisins. Si l'on adopte pour la France une estimation analogue, les pertes attribuables aux facteurs atmosphériques seraient de l'ordre de 3 milliards de francs par an.

Il n'est pas étonnant que le tribut soit aussi lourd, car toute la chaîne alimentaire d'origine agricole est continuellement soumise aux agressions du climat, et cela alors même que le végétal est encore en état de vie latente. La préparation du sol, la reconstitution de la



Depuis quinze ans l'équipement en tracteurs de l'agriculture française comme l'utilisation d'engrais azotés a suivi une progression constante et sensiblement régulière. On pourrait s'attendre à une progression analogue de la productivité agricole. C'est ce que dément le second graphique, en bas de page.



Sans doute, la productivité, pour les quatre types de cultures considérés, tend-elle à s'accroître, mais avec de très grosses fluctuations annuelles et des différences marquées d'une culture à l'autre, qui sont imputables aux conditions climatiques. A l'échelon régional, les variations seraient beaucoup plus grandes encore.

réserve hydrique nécessaire au futur développement, son propre comportement biologique sont étroitement tributaires des facteurs atmosphériques. Pour les céréales d'hiver, par exemple, le cycle végétatif ne peut s'accomplir totalement que si la graine a subi des températures voisines de 0°, sans toutefois que celles-ci descendent en dessous de -15°, seuil létal. De même, tout déficit pluviométrique hivernal accusé a les plus grandes chances de se traduire par une réduction de production, quelles que soient les conditions climatiques ultérieures. C'est en se basant sur de telles considérations que des prévisions de récolte

sont établies dès le début du printemps en Union Soviétique. Ces prévisions servent à planifier la commercialisation des céréales, à évaluer le volume des importations ou exportations et à orienter en conséquence la prospection des marchés extérieurs.

Au cours de la phase végétative active, tous les éléments des bilans hydrique et énergétique interviennent. L'intensité du rayonnement solaire conditionne l'activité photosynthétique tandis que les vitesses des réactions biochimiques au niveau de la cellule végétale sont directement fonction des températures de l'air qui les baigne. Toute anomalie dans leur succession habituelle risque de se manifester par un retard dans le cycle végétatif et par un déphasage irréversible par rapport à d'autres facteurs : rayonnement ou réserves hydriques. Enfin le végétal est le siège d'un circuit hydrique permanent, de la germination à la maturité ; des quantités énormes d'eau doivent transiter par les racines et les organes aériens avant d'être éliminées au niveau des feuilles. Un champ de maïs évapore en 6 mois plus de 6 000 tonnes d'eau par hectare. Toute restriction de ce débit, face à la demande atmosphérique, se traduit par une diminution corrélative des échanges de gaz carbonique, donc par la réduction de l'activité photosynthétique, même si le végétal bénéficie d'une énergie radiative suffisante. En dehors des périmètres irrigués, seules les précipitations naturelles alimentent les réserves hydriques de la couche arable. Qu'une sécheresse se manifeste, et des contraintes apparaissent qui modifient la dynamique de l'eau dans le sol et restreignent son débit au niveau du système radiculaire.

Par ailleurs, au moment même des récoltes, des circonstances atmosphériques adverses empêchent souvent l'agriculteur d'opérer à la date optimale. La fenaison en est l'exemple le plus classique, mais l'arrachage des betteraves aussi bien que la moisson ou les vendanges peuvent aussi être sérieusement affectés par un épisode pluvieux intempestif. Au-delà des récoltes, les produits agricoles bruts sont soumis à un certain nombre de manipulations et de traitements préparant leur commercialisation ; à ce stade également, les facteurs climatiques peuvent jouer un rôle non négligeable. En hiver, la conservation et le transport des fruits, pommes de terre, légumes, risquent d'être gravement compromis par des gels persistants.

Une planification à long terme ?

La planification à longue échéance des activités agricoles peut difficilement se concevoir sans un minimum de connaissance du climat local ou régional, exprimée de façon objective, c'est-à-dire en termes statistiques concernant les principaux paramètres atmosphériques.

Dès à présent les systèmes de gestion les plus élaborés conduisent à estimer pour chaque catégorie d'interventions (semis, façons culturales, traitements, récoltes, etc.) le nombre de jours dits « disponibles » pendant lesquels ces opérations sont réalisables. Pour un type de sol et une culture donnés, on peut envisager une approche statistique de la distribution de ces jours disponibles par le dépouillement de longues séries d'observations météorologiques. C'est dans cette voie que se sont engagés, en collaboration avec les services météorologiques, certains groupements professionnels agricoles, ainsi que des laboratoires de recherche agronomique. La récente introduction de la culture du maïs hybride dans le nord de la France constitue un bon exemple de cette prise en considération du climat en vue de décisions à long terme.

Serait-il raisonnable d'implanter un verger précoce sans un examen préalable des gelées printanières, afin de déterminer leur fréquence, leur intensité, leur distribution spatiale, leur durée, pour en déduire les risques encourus et éventuellement les procédés de défense les plus économiques ? Un dispositif automatisé de lutte par aspersion est, en effet, très souple, mais non exempt d'inconvénients : investissements élevés, possibilité de saturation et de dégradation du sol. Les chaufferettes à mazout, moins coûteuses à l'achat, exigent davantage de personnel et consomment un combustible onéreux. Le choix entre ces matériels dépendra de la fréquence et de la durée des interventions, lesquelles pourront être estimées par une étude climatologique locale.

On constate depuis plusieurs années une rapide extension des techniques d'irrigation à ce qu'il est convenu d'appeler la grande culture (betteraves, maïs). Il en résulte des investissements considérables. Un choix judicieux entre les matériels dépendra de la répartition saisonnière des épisodes secs, de leur durée, du niveau des réserves hydriques superficielles. Par conséquent, c'est seulement après une étude séquentielle détaillée des précipitations, de l'évapotranspiration, des bilans hydriques, qu'il conviendra d'arrêter la décision.

Les décisions quotidiennes

Les considérations, en quelque sorte stratégiques, qui orientent l'activité globale d'une entreprise agricole ne se posent à l'agriculteur qu'à intervalles espacés. Par contre, celui-ci se trouve chaque jour confronté à des problèmes opérationnels dont les solutions sont, elles aussi, étroitement tributaires du temps. A ce

Le Figaro Agricole

Divers moyens de protection sont utilisés contre les gelées. Des écrans de carton, par exemple, peuvent ralentir les pertes par rayonnement au cours des nuits froides, en particulier.

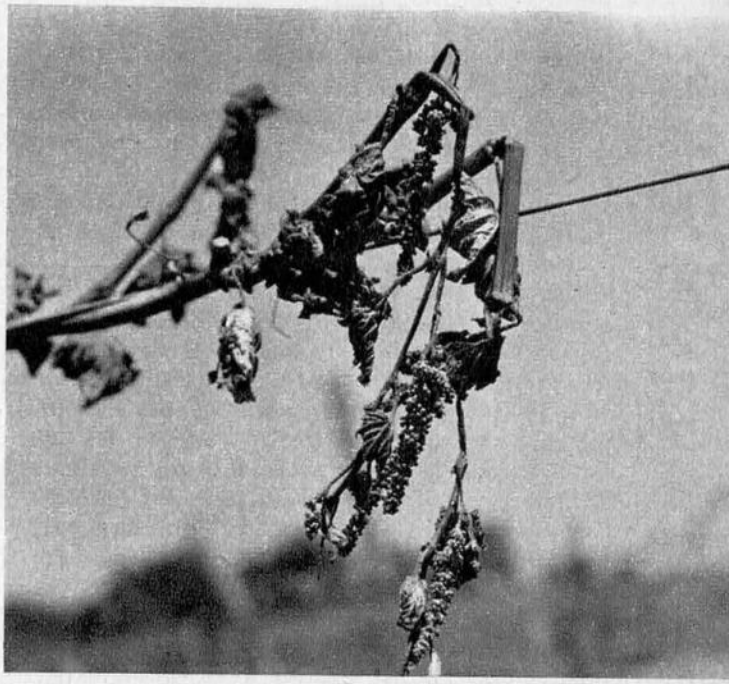
En l'absence de protection, ou avec une protection insuffisante, les végétaux fragiles, qui sont souvent aussi de très grande valeur économique, peuvent subir d'immenses dégâts du fait des gelées.

stade, observations récentes et prévisions à court terme sont à prendre simultanément en compte.

La plupart des interventions culturales (irrigation, épendage d'engrais, traitements phytosanitaires, travail du sol, etc.) doivent en effet correspondre à des états biologiques ou pédologiques bien définis qu'un technicien même averti ne peut toujours identifier avec rigueur. Beaucoup de ces états sont tributaires des effets cumulés d'événements climatiques antérieurs. Le degré de maturité des fruits, par exemple, est lié aux « sommes de températures » dont a bénéficié la plante depuis la levée de dormance et qu'il est facile de suivre de jour en jour. Les doses d'irrigation, leurs dates d'application, seront déterminées en comparant les hauteurs des précipitations aux valeurs de l'évapotranspiration des jours précédents, grandeurs qui peuvent être soit mesurées (précipitations), soit estimées à l'aide des paramètres climatiques courants (évapotranspiration).

D'autre part, chaque décision opérationnelle pourrait être mieux ajustée si l'agriculteur possédait des renseignements sur l'évolution du temps à brève échéance, de quelques heures à quelques jours. Mais alors une simple description générale ne suffit plus ; il conviendrait de disposer d'une estimation quantifiée des paramètres climatiques essentiels : occurrence, durée et hauteur des précipitations, niveau des températures, franchissement de seuils nocifs, insolation, rosée.

Certaines techniques de fenaison impliquent, par exemple, 48 heures de séchage naturel avant le remassage ; dans ce cas, des prévisions de séquences sans pluie à trois jours d'échéance se révèleront précieuses. Si la décision d'appliquer un traitement phytosanitaire résulte le plus souvent d'avis pertinents diffusés par les services de la « Protection des végétaux », les modalités de l'opération demeurent de la compétence de l'agriculteur et dépendent de l'évolution atmosphérique locale ; une prévision de pluie à quelques dizaines d'heures permettra d'éviter le lessivage des produits pulvérisés. L'application de désherbants hormonaux sélectifs, produits efficaces mais onéreux, n'est généralement réalisable qu'entre des limites assez étroites de température et peut être également compromise par une pluie inopinée. Pour la vigne, chacun sait que les derniers jours d'ensoleillement ont une action déterminante sur la qualité du vin. Par beau temps, le viticulteur aura intérêt à retarder quelque peu les vendanges, mais qu'arrive



alors un épisode pluvieux et la récolte risque d'être compromise ; des prévisions à quelques jours d'échéance (5 à 7) orienteront sa décision.

Dans le domaine des avis météorologiques opérationnels, il convient de traiter à part les actions de prévention contre les calamités atmosphériques, gel ou grêle, en particulier. L'application de procédés actifs de défense contre les gelées est toujours onéreuse et leur répétition est à l'origine d'inconvénients non négligeables (altération du sol, lessivage, brûlure d'organes aériens), mais une seule nuit de gel négligée peut anéantir toute espérance de récolte. Pour alerter les agriculteurs dans de bonnes conditions, un centre de prévision doit être informé des seuils nocifs et des périodes de sensibilité des cultures afin de porter toute son attention sur le détail des fluctuations de températures. Le réseau de mesures doit être assez dense pour permettre de diversifier les avis diffusés. Au cours des périodes gélives, l'agriculture doit pouvoir compter sur une succession d'avis à diverses échéances. Des exemples d'une telle coopération entre services météorologiques et usagers agricoles sont assez nombreux en France.

La rapidité du transfert de l'information étant l'une des conditions essentielles de son efficacité, les moyens de transmission les plus variés sont mis en œuvre. En Alsace, les maires des communes viticoles, alertés par téléphone, font sonner le tocsin ou déclenchent les sirènes. Dans le Sud-Ouest, l'ultime émission de télévision se termine, le cas échéant, par la confirmation ou l'annulation des avis de gel adaptés au territoire de chaque émetteur régional. Dans le Vaucluse, un émetteur « ondes courtes » diffuse un bulletin agrométéorologique horaire. En ce qui concerne les procédés de lutte contre la grêle, les contrôles statistiques des résultats obtenus jusqu'à présent sont peu convaincants et prouvent qu'on en est encore à la phase expérimentale. La Météorologie Nationale apporte un concours actif aux recherches entreprises par des laboratoires universitaires. En outre, ses services d'analyse et de prévision s'efforcent d'identifier les situations synoptiques favorables aux mouvements convectifs générateurs de nuages grêligènes, puis de localiser ces derniers à l'aide des radars de surveillance. On peut espérer qu'une meilleure coordination des efforts de chacun conduira, sans trop tarder, à la mise au point de méthodes réellement efficaces et économiques.

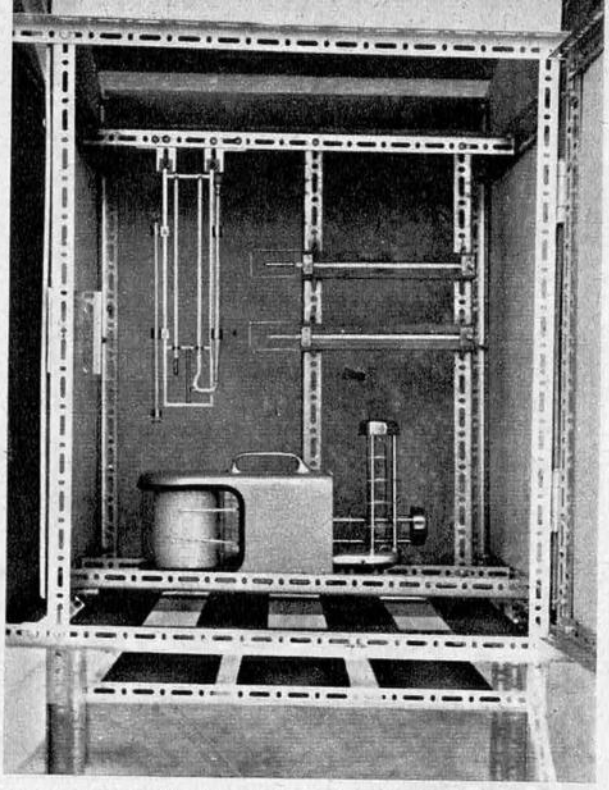
Les observations météorologiques locales

L'agriculteur a besoin de renseignements adaptés à ses activités et au climat local auquel il est soumis. Certains facteurs climatiques qui ne présentent qu'un intérêt secondaire pour l'étude du comportement global de l'atmosphère sont des plus précieux pour l'agriculture. Toute assistance agrométéorologique devra donc s'appuyer sur un réseau d'observations complémentaires suffisamment dense. On est amené à distinguer deux catégories d'installations.

A l'échelon local, de tels postes agrométéorologiques peuvent guider l'élaboration des décisions.

Dans les postes agroclimatiques que l'on pourrait qualifier de *principaux*, sont relevés les facteurs du bilan hydrique et du bilan énergétique au voisinage du sol. La densité optimale de telles implantations paraît être de 3 à 4 par département (davantage dans les régions au relief tourmenté). On y trouverait utilement les installations suivantes :

- un abri complet du type agrométéorologique pour l'enregistrement de la température, de l'évaporation et de l'humidité, avec possibilité de lecture directe pour l'étalonnage ;
- un héliographe pour la mesure des durées d'insolation ;
- un pluviomètre ;
- un totalisateur de vent enregistrant les mouvements de l'atmosphère qui interviennent dans l'intensité des échanges de vapeur d'eau ou de gaz carbonique ;
- des thermomètres à minimum placés à 10 et 50 cm au-dessus du sol pour estimer les températures minimales subies par la végétation ;
- des sondes thermométriques installées à deux ou trois profondeurs dans le sol, plus spécialement à 5, 10 et 20 cm.



Une gamme d'instruments assez large peut prendre place à l'intérieur d'un abri agrométéorologique.

A l'échelon inférieur, un poste simplifié pour la mesure de l'évaporation et des températures.

La variabilité spatiale de certains facteurs atmosphériques conduit à accroître encore la densité de leurs mesures. Il serait souhaitable que, sur chaque exploitation ou groupe d'exploitations voisines, soit implanté un *poste simplifié* où, à côté des hauteurs des pluies, on relèverait les températures extrêmes et éventuellement l'évaporation. Dans certains cas (arbres fruitiers, primeurs, vignes), on peut être amené, à l'époque des gelées, à multiplier les relevés de minimum au sein d'une même exploitation. Le coût d'un poste climatologique est toujours assez modeste par rapport aux investissements qu'exige un matériel moderne. Une installation déjà complète avec abri agrométéorologique grand modèle n'excède pas 3 000 à 3 600 F, tandis qu'avec 500 F on peut disposer d'un poste simplifié.

La diffusion de l'information

Qu'il s'agisse de données numériques relatives au temps passé récent, de renseignements climatologiques adaptés ou de bulletins prévisionnels, un des problèmes essentiels est de faire parvenir l'information à l'utilisateur dans un laps de temps très court, car cette information perd rapidement de son intérêt. L'acheminement doit être particulièrement rapide pour les prévisions à court terme et les avis opérationnels. La radio ou la télévision permettent d'alerter sans délai un grand nombre de correspondants, mais on ne peut encombrer les programmes de bulletins trop techniques, sans intérêt pour la majorité des auditeurs. Des avis de gel sont toutefois émis de cette façon à la satisfaction des intéressés, tandis que, régulièrement (le mercredi) des prévisions valables pour la semaine sont diffusées sur France Inter au cours de l'émission agricole de 12 h 20. Autre solution, des répondeurs automatiques mettent en permanence l'information météorologique à la disposition de l'usager agricole. A tout moment, sur simple appel téléphonique, celui-ci peut disposer de prévisions à courte échéance, parfois de conseils précis pour les interventions culturales les plus urgentes. Une trentaine de ces dispositifs ont été mis en place, tant par les services météorologiques que par des organisations professionnelles (associations climatologiques, chambres d'agriculture) ou par des commissions météorologiques départementales. Nous avons déjà évoqué l'expérience en cours dans le Vaucluse, où les renseignements météorologiques sont diffusés chaque heure par un émetteur ondes courtes (81 MHz), situé au sommet du Ventoux, et dont les émissions peuvent être captées sur les postes récepteurs du commerce.

Enfin, il est toujours possible à un correspondant de s'adresser directement à une station départementale ou à un centre régional. Une telle procédure devrait cependant rester exceptionnelle et il paraît préférable que les agriculteurs passent par l'intermédiaire d'organisations professionnelles susceptibles de filtrer les demandes et éventuellement d'en préciser les termes.

Patrick BROCHET

AVIATION COMMERCIALE

L'aviation commerciale reste un client privilégié de la météorologie qui lui consacre une grande partie de ses moyens. Tous les aérodromes de quelque importance sont desservis par une station météorologique où les pilotes peuvent obtenir une assistance ou, pour employer le terme consacré, une « protection » météorologique. Cette assistance est d'ailleurs soumise à des règlements internationaux et elle est constamment adaptée à l'évolution de l'aéronautique.

Deux ordres de besoins

Essentiellement tributaire à l'origine des conditions météorologiques, l'avion a pu largement s'en affranchir à mesure que le matériel volant devenait plus sûr et que les moyens de navigation se perfectionnaient. Mais à la notion de sécurité, mission primordiale de la météorologie, s'est ajoutée la notion de rentabilité pour les compagnies aériennes. Celles-ci ont de plus en plus le souci d'exploiter leurs avions de la manière la plus économique.

La météorologie doit donc faire face à des besoins complémentaires : ceux des exploitants et ceux des pilotes.

L'exploitant veut d'abord savoir si le vol projeté pourra avoir lieu normalement, c'est-à-dire, d'une part, si les conditions météorologiques aux aéroports permettront le décollage et l'atterrissage et, d'autre part, si aucun phénomène dangereux ne conduira pas à un changement d'horaire ou d'itinéraire. Il lui faut ensuite établir un plan de vol d'où ressortiront la durée du trajet et la quantité de carburant à emporter, c'est-à-dire la charge marchande offerte. Les paramètres *vent* et *température* jouent un rôle important dans l'établissement de ce plan de vol. Pour certains vols long-courriers (transatlantiques, par exemple), les compagnies aériennes ont même besoin de connaître la route la plus rapide, car l'heure de vol coûte cher.

Le commandant de bord est responsable de son appareil et des passagers ; c'est lui qui, en dernier ressort, décidera de la conduite du vol et de la quantité de carburant. Son premier souci est d'assurer la sécurité des biens et des personnes qui lui sont confiés, mais il doit aussi s'efforcer de remplir sa mission dans les meilleures conditions de confort pour les uns et les autres. Il doit donc éviter les zones atmosphériques de turbulence, d'orages, ou de givrage et connaître à l'avance l'emplacement de telles zones. Le vent et la température influent sur les performances de l'avion et sur son altitude de croisière optimale. D'où la nécessité de disposer de prévisions sûres concernant ces deux paramètres. En outre, le pilote doit savoir aussi tôt que possible s'il pourra atterrir à l'aéroport de destination ou s'il doit envisager un déroutement. Un certain nombre de facteurs, enfin, jouent un rôle important au décollage et à l'atterrissage. Ce sont le vent, la visibilité, l'altitude de la base des nuages, les phénomènes atmosphériques (hydrométéores, grains, orages, etc.), la température et la pression atmosphérique.

Au total, l'assistance à l'aviation commerciale se manifeste pendant la phase préparatoire du vol puis tout au long de ce vol. On distingue ainsi :

- l'assistance avant le départ,
- l'assistance au décollage et à l'atterrissage,
- l'assistance en vol.

L'assistance avant le départ

Elle est assurée par le Centre météorologique qui dessert l'aérodrome. Elle commence, quelques heures avant le décollage, par la four-

J. P. Bonnin

Problèmes de sécurité, de régularité, de rentabilité économique, tout concourt à faire des compagnies aériennes et des aéroports des « clients » particulièrement exigeants. Les formes de l'assistance météorologique sont ici multiples. Lors de la préparation d'un vol, par exemple, le commandant de bord reçoit des météorologistes des indications détaillées sur les phénomènes prévus en cours de route.

Air France

niture de renseignements aux représentants des compagnies aériennes pour les besoins du planning avant le vol. Ils doivent permettre de décider du chargement de l'appareil en instance de départ et éventuellement de différer ou même d'annuler ce départ. Ils comportent les éléments suivants :

- présentation des cartes d'analyse les plus récentes avec exposé de la situation météorologique générale ;
- indication des conditions météorologiques prévues sur le trajet envisagé et sur les aéroports concernés (départ, destination, déroutements).

Ces renseignements sont donnés en partie oralement, mais l'essentiel se présente sous forme de cartes décrivant les champs de vent et de température prévus à une heure déterminée, ainsi que la position des phénomènes significatifs à cette même heure.

Une ou deux heures avant le décollage, le commandant de bord reçoit un exposé verbal et une documentation de vol. L'exposé verbal présente toutes les données de prévision du temps sur les régions qu'il va survoler. Une évolution différente de celle qui est la plus probable est toujours possible et il convient d'attirer l'attention du pilote sur les répercussions qui pourraient en résulter sur une région définie.

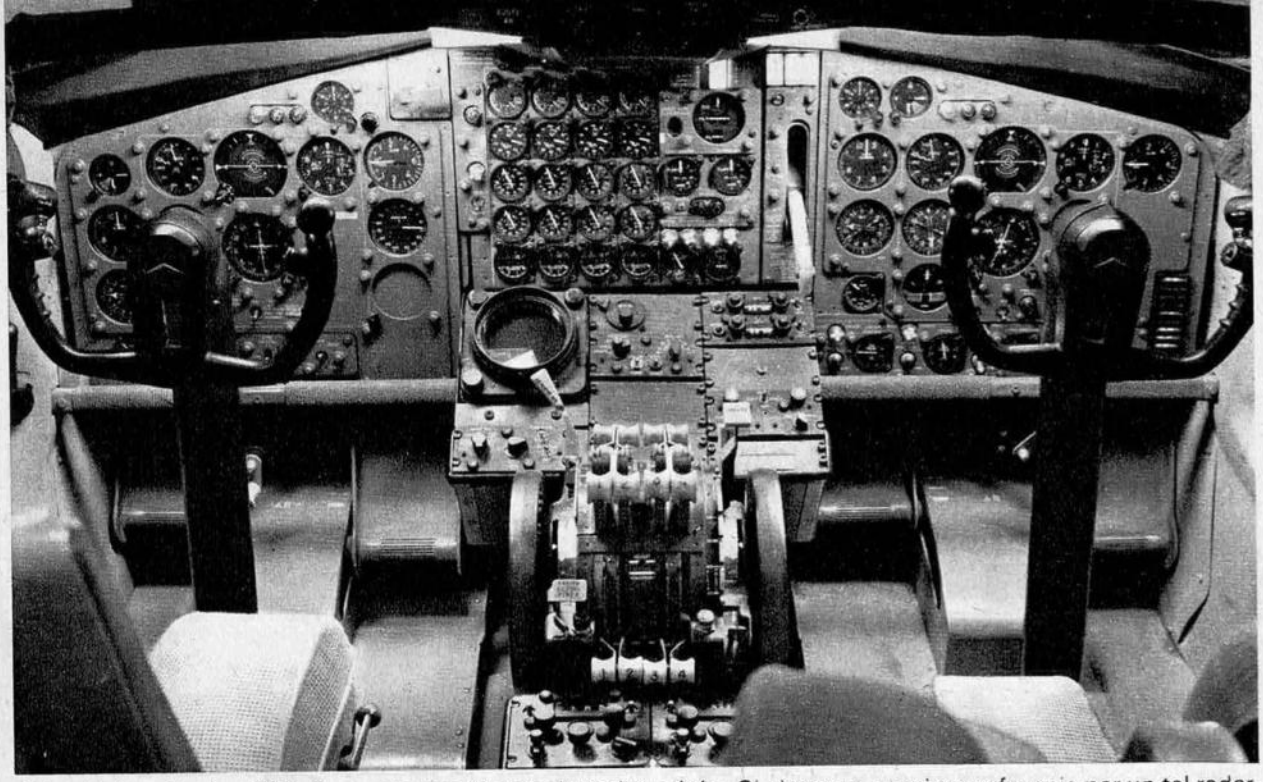
La documentation de vol est destinée à la phase en route et doit couvrir l'ensemble du trajet. Elle comprend des prévisions détaillées relatives aux aérodromes de départ, d'arrivée et de déroutement (vent, visibilité, plafond, phénomènes météorologiques) et des cartes représentant (pour l'heure moyenne du vol) :

— les phénomènes significatifs : fronts avec leurs directions et vitesses de déplacement, couches nuageuses givrantes, hydrométéores, zones de turbulence, zones orageuses, ondes orographiques...

— les champs de vent (direction et vitesse) et de température, à deux, trois ou quatre niveaux choisis en fonction du niveau de vol : 850 mb (altitude standard 1 500 m) ; 700 mb (altitude standard 3 000 m) ; 500 mb (altitude standard 5 600 m) ; 300 mb (altitude standard 9 000 m) ; 200 mb (altitude standard 11 800 m).

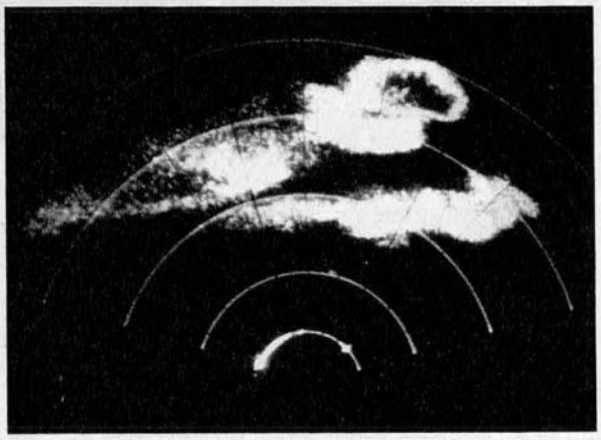
Ces cartes de prévision sont élaborées sur place ou reçues par facsimilé de centres météorologiques nationaux ou étrangers. Le Centre météorologique principal d'Orly, par exemple, élabore toute la documentation, prévisions d'aéroports d'arrivée exceptées, pour tous les vols sauf ceux vers les Etats-Unis et le Canada. Pour ceux-ci, il utilise les cartes diffusées par le Centre de Londres.

C'est par accord international qu'a été confiée à quelques grands centres la charge d'établir



Air France

A bord d'un Boeing 707. On remarque l'écran du radar météo. Ci-dessous, une image fournie par un tel radar.



Ekco Electronics

et de diffuser les documents couvrant les besoins dans une zone déterminée. A ce titre, le centre d'Orly a la charge des vols partant d'Europe et se dirigeant vers l'Afrique de l'Ouest.

L'assistance en vol

Pendant la phase en route, les équipages ont deux possibilités pour obtenir des informations météorologiques :

— par l'écoute d'émissions spécialisées sol-air en radiotéléphonie (émissions Volmet) ;

— par interrogation d'un centre de veille (par l'intermédiaire d'un centre de contrôle régional de la circulation aérienne ou d'un centre d'information en vol).

Les émissions Volmet contiennent des observations et des prévisions renouvelées toutes les demi-heures et concernant des aéroports déterminés, classés dans un ordre immuable. Elles sont de deux sortes :

— émissions V.H.F. à très haute fréquence et à faible portée, destinées aux appareils effectuant des vols à courte distance et aux vols long-courriers dans la dernière partie de leur trajet ;

— émissions H.F. à haute fréquence et à longue portée qui peuvent être captées par les long-courriers et permettent aux équipages de suivre l'évolution des conditions météorologiques à leur aéroport de destination et à ceux de déroutements.

Le centre de veille météorologique a la charge d'une région déterminée et porte une attention particulière aux phénomènes susceptibles de compromettre la sécurité des vols au-dessus de cette région. Il dispose notamment d'observations faites à l'aide de radars météorologiques et donnant la position et l'extension des zones de fortes précipitations (où règnent généralement des courants verticaux intenses et une turbulence dangereuse). Il élabore ainsi des messages d'information à la disposition des contrôleurs de la circulation aérienne qui les communiquent aux appareils en contact. Le centre de veille météorologique répond par ailleurs à toute demande de renseignements qui lui est adressée (prévision de vent et de température à un niveau et sur une route donnés, par exemple).

A l'atterrissage et au décollage

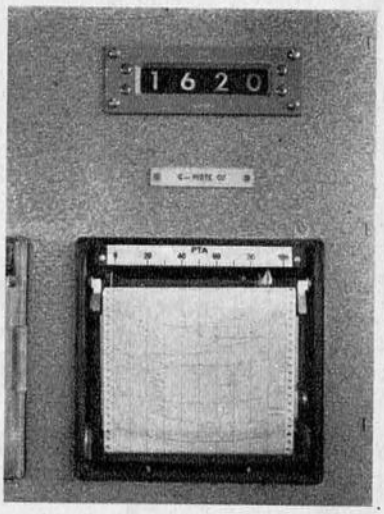
Les stations météorologiques situées sur les aérodromes exécutent des observations, soit systématiques, soit sur demande du contrôle local, à l'intention des appareils en procédure d'atterrissage ou de décollage. Ces observations exigent la mise en place d'instruments spécia-

lement conçus et portent sur les éléments suivants :

- vent en surface ;
- visibilité horizontale ou portée visuelle de piste ;
- altitude de la base des nuages ;
- température de l'air et point de rosée (ou état hygrométrique) ;
- pression atmosphérique ;
- phénomènes météorologiques dangereux.

La mesure du vent au sol, en particulier au voisinage de l'entrée de piste, est de la plus grande utilité à l'atterrissage comme au décollage. Les avions commerciaux, toujours plus lourds, sont moins sensibles au vent, mais leur forte inertie les rend moins maniables. Quant au vent moyen tout au long de la piste, il influe directement sur les performances au décollage. Il est alors nécessaire de connaître la valeur moyenne de la composante axiale du vent, en utilisant soit les anémomètres et girouettes classiques, soit des anémomètres spéciaux indiquant directement cette composante et dotés d'une constante de temps artificielle de l'ordre de la minute. Pour répondre aux problèmes de maniabilité et de sécurité à l'atterrissage, il est nécessaire de mesurer les rafales, surtout à l'entrée de la piste, et éventuellement leur composante transversale instantanée.

Les mesures de visibilité, surtout de faible visibilité, sont toujours indispensables, mais elles doivent s'adapter à des besoins en évolution constante. Dans le cas du brouillard, des transmissomètres convenablement disposés le long de la piste permettent la télémesure de l'absorption des faisceaux lumineux par l'atmosphère et leur conversion en visibilité des balises lumineuses qui jalonnent ou délimitent la piste. Cette conversion est réalisée par un petit calculateur programmé selon les caractéristiques des feux et tenant compte automatiquement des conditions de luminosité ambiante et des divers réglages d'intensité lumineuse de ces feux. On obtient alors un affichage numérique des « portées visuelles de piste ».



Un petit calculateur électronique détermine et affiche (ci-contre) la portée visuelle de piste à partir des données fournies par un transmissomètre.

Malgré les moyens de guidage de plus en plus perfectionnés, les mesures concernant les nuages restent utiles. Elles sont faites par des télémètres de nuages, qui sont des radars à longueurs d'ondes lumineuses, d'axe vertical, qui permettent l'enregistrement à distance de l'altitude de la base des couches nuageuses, mesurée au voisinage du point de « percée ».

Tout comme le vent, la température influe sur les performances au décollage, surtout au-dessus d'un certain seuil, variable suivant le type de l'avion. Les avions à réaction y sont particulièrement sensibles. Ainsi, pour un quadriréacteur type Boeing 707, la charge maximale diminue de 600 kg par degré centigrade lorsque la température dépasse 26 °C.

La mesure de la pression sert au réglage des altimètres et est donc un élément fondamental de sécurité à l'atterrissage par mauvais temps. Elle s'effectue à l'aide des baromètres à mercure classiques, mais tend à s'automatiser en vue d'un affichage numérique direct qui supprimerait toutes les corrections manuelles et accroîtrait la rapidité et la sûreté des lectures.

Les trois éléments, vent, température et pression, font l'objet de prévisions à courte échéance (2 à 3 heures) pour le calcul de la charge au décollage.

Au sommet d'un pylône, girouette et anémomètre permettent d'établir, en particulier à l'entrée de piste, les caractéristiques du vent, qui influent largement sur le comportement d'un avion.

Les problèmes des transports supersoniques

L'exploitation commerciale des avions supersoniques n'est pas encore commencée, mais les besoins de cette catégorie d'avions ont déjà

été exprimés avec précision par les constructeurs et les compagnies aériennes. Pour y faire face, la météorologie doit étendre jusqu'à des altitudes de l'ordre de 24 km les observations et prévisions de vent et de température, en augmentant leur précision.

Le profil des températures au long d'un trajet aura une grande importance pour le déroulement du vol. Pendant la phase de montée, et plus spécialement au cours de l'accélération transsonique, la consommation de carburant augmente rapidement lorsque la température dépasse la température standard. En vol de croisière dans une atmosphère relativement chaude, l'avion supersonique ne pourra atteindre son altitude optimale et le pilote pourra être amené à réduire la vitesse pour éviter un échauffement cinétique excessif. Dans le cas de Concorde, l'augmentation de la consommation qui en résulterait entraînerait une diminution de la charge marchande de 10 passagers lorsque la température dépassera de plus de 5 °C la température standard (— 56,5 °C au-dessus de 11 000 m).

Le vent aura dans l'ensemble une influence plus faible sur les supersoniques que sur les avions subsoniques. Elle ne sera cependant pas négligeable dans tous les cas.

Il faut aussi signaler que l'état de l'atmosphère entre l'avion et le sol (structure thermique, vent, turbulence, nébulosité) influe sur l'intensité et la propagation de la détonation balistique, plus particulièrement sur les phénomènes de focalisation de l'onde de choc (superbangs) lors de l'accélération transsonique.

A vitesse supersonique, l'avion devra éviter impérativement de pénétrer dans les sommets de cumulonimbus dans lesquels les risques d'érosion par des hydrométéores peuvent être sérieux. Quant à la turbulence en air clair, elle se rencontre aussi aux altitudes de croisière des supersoniques, bien que sa valeur propre soit plus faible que celle des plus bas niveaux. En raison de la grande vitesse de l'avion, elle pourrait cependant engendrer de fortes accélérations verticales.

Pendant la phase d'atterrissage, l'appareil supersonique aura des besoins analogues à ceux des avions actuels, mais la durée de la procédure de descente devra être aussi courte que possible. Les prévisions locales à brève échéance présenteront donc une importance accrue.

Perfectionner l'assistance

L'assistance météorologique n'est évidemment pas totalement satisfaisante. Les grandes organisations : Organisation Météorologique Mondiale, Organisation Internationale de l'Aviation Civile, Association Internationale des Transporteurs Aériens, débattent au cours de leurs réunions des besoins nouveaux et des moyens propres à les satisfaire.

Pour les phases initiales et terminales d'un vol, il s'agit surtout de compléter les données d'observations « actuelles ». Deux éléments importants devraient être mis à la portée des pilotes, mais leur détermination pose encore des problèmes. Il s'agit d'abord du cisaillement du vent, c'est-à-dire des variations de direction et de vitesse du vent dans l'axe de la piste pour les dernières minutes qui précèdent l'atterrissage. Ces variations réagissent sur le comportement de l'avion et peuvent provoquer des atterrissages « trop courts » ou « trop longs » ou des impacts en bordure de la piste. Pour déterminer ce paramètre, il faudrait effectuer des mesures en altitude, jusqu'à 100 m environ, peut-être à l'aide de pylones. Ceux-ci ne peuvent, toutefois, être implantés trop près de la piste pour des raisons de sécurité. Seuls, finalement, des sondages par ballons et radars spéciaux semblent pouvoir apporter une solution.

Le deuxième point concerne l'examen des phénomènes dangereux aux alentours de l'aéroport (bancs de brouillard, par exemple). L'installation de stations automatiques spécialisées pour surveiller certains paramètres, comme la visibilité et l'altitude de la base des nuages est envisagée. Elle permettrait de constituer une ceinture de protection autour des grands aéroports.

Dans le même ordre d'idées, la détection et la localisation des zones de fortes pluies ou d'orages dans un rayon de 100 km sont également des facteurs de sécurité. Ils permettent d'informer le pilote des volumes atmosphériques rendus dangereux par les turbulences et les courants verticaux qui y sont très généralement associés. Un réseau de radars météorologiques fonctionne déjà, mais, outre que leurs performances sont encore insuffisantes, leurs indications sont utilisées surtout pour les besoins synoptiques ou pour l'information des équipages en vol. Des radars à hautes performances fonctionnant sur 10 cm vont être mis en place progressivement.

Pour la phase en vol, l'amélioration des prévisions est activement recherchée par l'utilisation de puissants calculateurs et par l'implantation de stations d'observation dans les régions défavorisées.

Lucien THIBORD

Photo France-Soir

AVIATION LÉGÈRE

Parmi les aspects divers de l'aviation légère, il faut distinguer en premier lieu entre les deux grandes activités que sont le vol à voile et l'aviation légère à moteur. Différentes du point de vue purement aéronautique, par les techniques et même par l'esprit, ces deux disciplines le sont aussi, bien entendu, sur le plan de l'assistance météorologique.

Vol thermique et vol de montagne

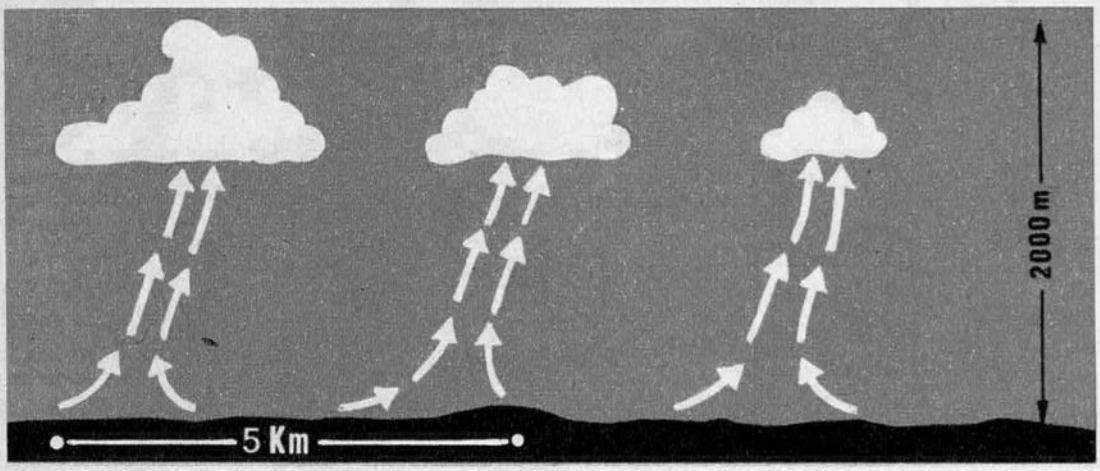
Le vol à voile utilise pour la sustentation et la propulsion l'énergie de l'atmosphère elle-même. Le planeur est une magnifique machine volante, mais c'est aussi un engin inerte qui ne possède aucune source propre d'énergie. Pour qu'il vole, il faut d'abord le faire remorquer en altitude par un avion ou un treuil. Ensuite, tout dépend du talent du pilote et de son adresse à déceler les zones de vent ascendant au sein desquelles le planeur peut s'élever. La technique est complexe, à base d'observation et d'improvisation réfléchie, car les phénomènes au sein desquels le planeur évolue sont fluctuants, partiellement invisibles et riches de surprises.

On comprend que les adeptes du vol à voile aient toujours recherché la collaboration des météorologistes, collaboration qui, d'ailleurs, s'est révélée bénéfique aux uns et aux autres. Car si les météorologistes ont pu renseigner les pilotes sur certaines particularités de la mécanique de l'atmosphère, ils ont trouvé dans le planeur un excellent instrument de recherche expérimentale.

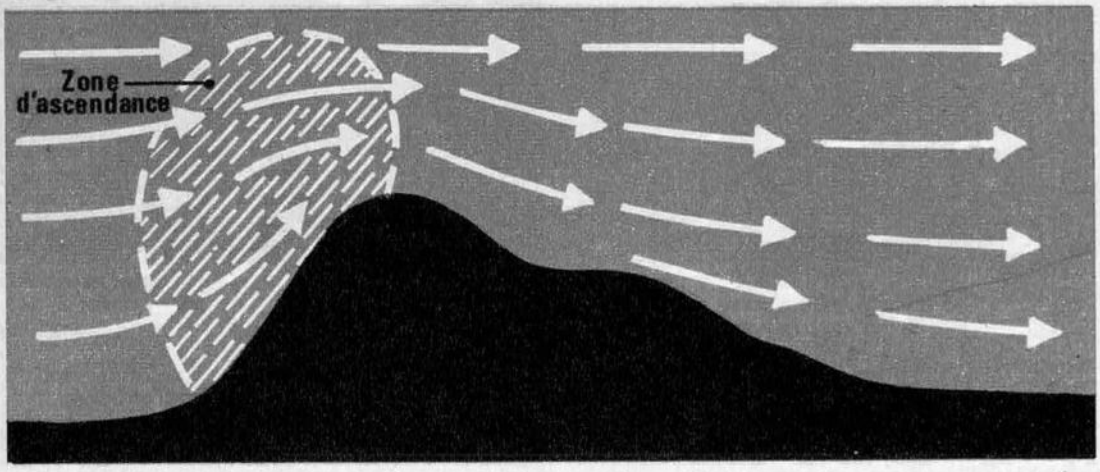
On pratique actuellement deux techniques de vol à voile, différentes par la nature des énergies utilisées.

Dans le *vol thermique*, on se sert des courants de « convection » qui se développent au-dessus du sol échauffé par le soleil. Dans les meilleures conditions, ces courants s'organisent en colonnes ascendantes sensiblement verticales. Leur diamètre est de quelques centaines de mètres cependant que leur extension en altitude est généralement supérieure au millier de mètres. Lorsqu'elles sont suffisamment développées, elles se matérialisent par des nuages caractéristiques, à base plate et au sommet bouillonnant, que les météorologistes nomment « cumulus ».

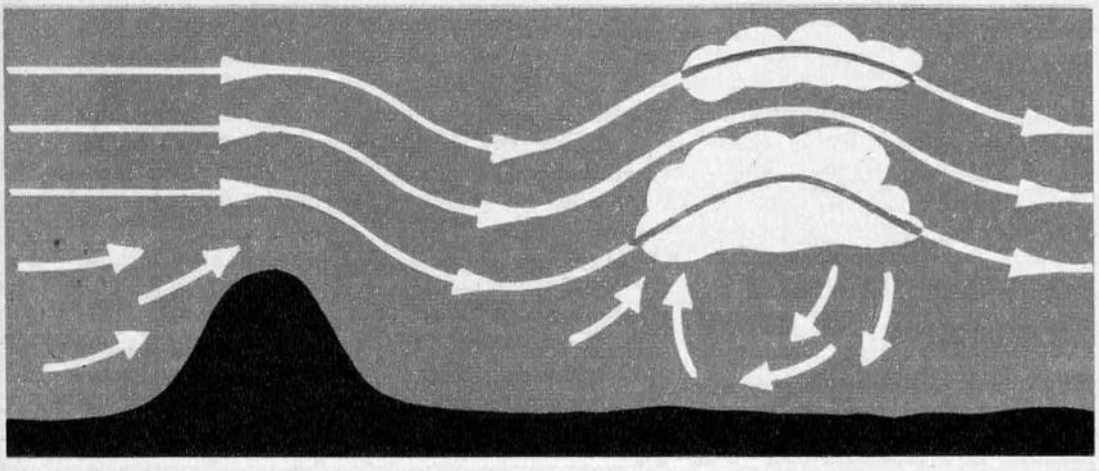
La vitesse ascendante, de l'ordre de plusieurs mètres par seconde, dépasse en principe la vitesse naturelle de descente du planeur, inférieure au mètre par seconde. Le planeur qui se



Le vol « thermique » met à profit les courants ascendants développés à partir du sol chauffé par le Soleil. Ces courants sont sensibles au-delà de 1 000 m. Ils entraînent la formation des « cumulus ».



La pente « au vent » d'une montagne provoque une déflexion vers le haut des filets d'air. Les reliefs sont ainsi responsables de courants ascendants utilisables par les planeurs.



Plus intéressantes pour des parcours importants sont les ondes de ressaut sous le vent d'une montagne. L'effet de contournement et la convection thermique s'unissent en en une onde d'une dizaine de kilomètres de longueur.

trouve dans une ascendance manœuvre pour s'y maintenir en virant de façon continue, entraîné progressivement en altitude. Bien entendu, la prise d'une ascendance n'est qu'une phase du vol. Ayant gagné une altitude suffisante, le pilote peut amorcer un long vol plané descendant qui l'amène, quelques dizaines de kilomètres plus loin, au pied d'une nouvelle colonne. Ainsi, un voyage se compose d'une suite de montées en ascendances, pendant lesquelles le planeur emmagasine une certaine énergie potentielle, qu'il transforme en distance parcourue au cours de la descente. Pour peu que la situation soit favorable, les vols de distance en ligne droite ou en circuit de plus de 500 km ne sont pas rares. Le record de distance libre est actuellement détenu par l'Américain Parker avec 1 041 km.

Le vol dit *de montagne* comporte plusieurs variantes. La plus simple consiste à utiliser la déflexion du vent par une pente bien exposée. C'est une méthode rustique qui ne permet ni les gains d'altitude substantiels, ni, par conséquent, les voyages. Par contre, les

« ondes de ressaut », qui se produisent dans certaines conditions sous le vent des chaînes de montagnes, permettent d'atteindre des altitudes beaucoup plus intéressantes. Il s'agit d'un processus bien connu en mécanique des fluides, apparaissant lorsqu'un obstacle fixe est placé dans un courant. Un tel système ondulatoire apparaît sous la forme d'une alternance de zones d'ascendance et de descendance stationnaires par rapport au sol. La longueur d'onde atteint en moyenne une dizaine de kilomètres. L'amplitude verticale est relativement faible, de l'ordre de la centaine de mètres. Toutefois, l'épaisseur totale d'atmosphère gagnée par l'ébranlement est considérable et dépasse parfois une dizaine de kilomètres.

Les ondes de montagnes constituent pour le planeur une remarquable source d'énergie. Les zones d'ascendance sont vastes et pratiquement exemptes de turbulence. La vitesse verticale y dépasse couramment 3 à 5 m/s. En général, des nuages de forme lenticulaire caractéristique surmontent les branches ascendantes et permettent leur localisation. Les gains d'altitude par cette méthode dépassent souvent 5 000 m, et l'on pourra juger de l'efficacité de la technique d'après le record international d'altitude qui atteint actuellement près de 13 000 m (P. Bikle, U.S.A.).

Les problèmes météorologiques

Les phénomènes météorologiques utilisables pour le vol à voile ne représentent qu'une faible part de l'extraordinaire variété des manifestations de l'atmosphère. Leur fréquence d'apparition est donc faible, et les situations météorologiques favorables relativement rares, en particulier pour les grandes performances. Il est donc utile de connaître plusieurs jours à l'avance l'évolution générale de la situation, et, au moins quelques heures avant le départ, les conditions précises sur le parcours, afin que le vol ne risque pas d'être interrompu par un changement du temps local.

Le problème se pose de façon analogue dans l'établissement du programme d'un centre de vol à voile et l'intérêt de l'assistance météorologique est évident, assistance qui doit être spécialisée de manière à répondre aux questions souvent très particulières que posent les pilotes. Elles portent non seulement sur l'existence et l'étendue horizontale des zones convectives, mais sur l'organisation interne des ascendances. Le succès de la prévision exige ainsi une collaboration étroite entre pilotes et météorologistes, collaboration qui a d'ailleurs conduit certains météorologistes à « prendre le manche » pour leur propre compte et à devenir des pilotes valables.

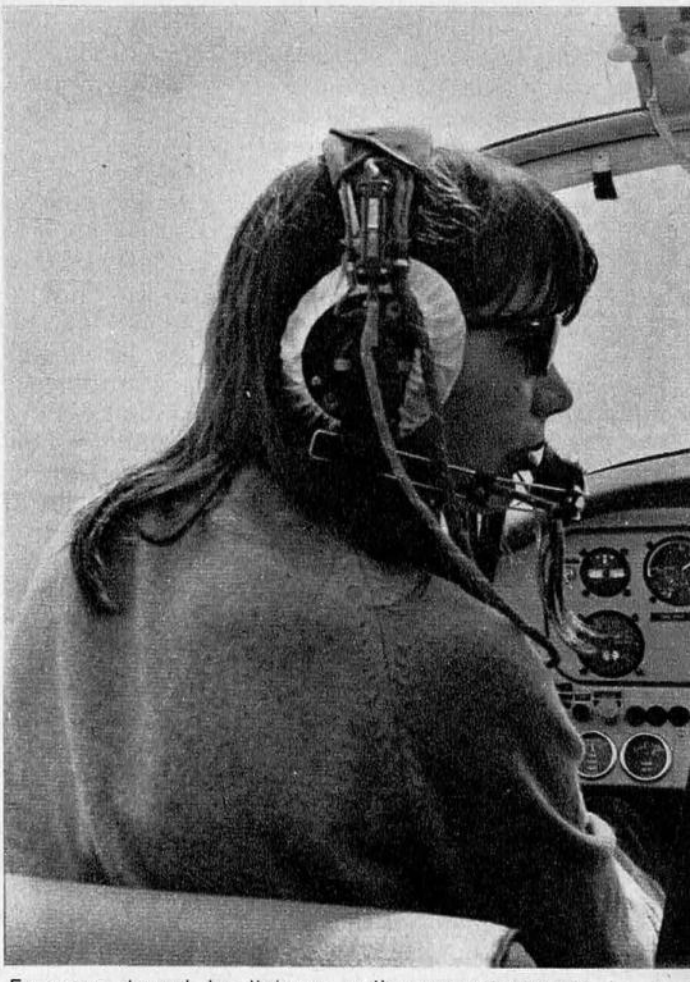


Photo Paris-Match - François Pages

En cours de vol, les liaisons radio permettront parfois au pilote de compléter ses informations météo.

Les sources d'énergie du vol à voile sont essentiellent liées à des effets locaux. L'échelle horizontale du cumulus est à peine de l'ordre du kilomètre, cependant que l'onde de relief est inexorablement liée à l'orographie. Toutefois, le développement de tels phénomènes s'inscrit au sein de systèmes beaucoup plus étendus. Leur pronostic ne peut atteindre une précision raisonnable sans une synthèse à grande échelle de la situation météorologique.

Les méthodes de prévision pour le vol à voile doivent tenir compte de ce double caractère. A grande échelle, elles s'inscrivent dans les techniques habituelles de la météorologie. Du point de vue local, il a fallu, par contre, accomplir un effort spécial pour augmenter l'efficacité des informations.

Par exemple, la définition en épaisseur de l'atmosphère, donnée par radiosondage, est adaptée surtout au travail à grande échelle. Les courbes donnant la variation verticale des paramètres caractéristiques y sont quelque peu simplifiées, surtout dans les basses couches, jusque vers 3 000 m, région particulièrement importante pour les planeurs.

Pour remédier à ces insuffisances, on tend actuellement à effectuer les observations par avion, chaque fois que c'est possible. On utilise alors des avions lents, équipés d'un ensemble classique de mesure de la pression, de la température et de l'humidité. Ils permettent une exploration détaillée et précise des couches atmosphériques jusque vers 3 000 ou 4 000 m. Le « prévisionniste », dans certains cas, exécute lui-même les observations. Les mesures quantitatives sont alors complétées par des remarques sur l'allure des nuages, les changements de visibilité en altitude, la turbulence, qui sont très significatives pour un initié. Revenu à terre, le prévisionniste dépouille ses mesures, étudie les résultats dans le contexte de l'analyse de grande échelle et envisage les divers types de vol possibles en fonction de la situation.

Les renseignements ainsi élaborés doivent parvenir aux pilotes. Cette phase essentielle de l'assistance pose de nombreux problèmes qu'il n'est pas toujours possible de résoudre parfaitement, en raison surtout de la dispersion géographique des utilisateurs.

Certains centres importants (la Montagne Noire, St-Auban sur Durance) sont dotés d'une station météorologique spécialisée. A l'occasion des grandes compétitions nationales ou internationales, une station provisoire est établie pendant la durée des manifestations sur l'aérodrome concerné. Enfin, pour la grande majorité des pilotes, il reste la possibilité d'utiliser le téléphone pour consulter les services compétents et compléter les bulletins spéciaux diffusés par l'O.R.T.F. Il faut remarquer que le pilote entraîné n'attache pas, en général, une importance exagérée à la prévision proprement dite. Il tend plutôt à considérer le météorologiste comme un conseiller technique, à qui il demande une analyse de la situation et des conseils sur les possibilités d'exploitation.

L'esprit « aéronautique » des prévisionnistes contribue beaucoup à l'efficacité de l'assistance. Certains d'entre eux, nous l'avons dit, sont pilotes. Ils connaissent donc la vie d'un aérodrome, l'ambiance assez particulière qui y règne, enfin l'argot technique qui y est utilisé. Ces facteurs psychologiques facilitent la compréhension mutuelle et augmentent l'efficacité de l'assistance.

L'aviation à moteur

Alors que le vol à voile est une discipline purement sportive, le vol en étant à la fois le moyen et le but, l'aviation légère à moteur a des vocations plus diversifiées, à la fois sportives et utilitaires. Le terme « aviation légère à moteur »

Rapho

recouvre en fait plusieurs formules différentes. L'aviation dite « d'affaires », de développement relativement récent en France, dispose d'avions équipés en moyens de pilotage sans visibilité et de radionavigation, ce qui les rend techniquement très proches des avions de ligne. Leurs équipages sont entraînés à utiliser les procédures de l'aviation commerciale et, malgré leur appartenance à l'aviation légère, cette catégorie d'appareils ne pose pas de problème particulier.

A l'autre extrémité de la famille, nous trouvons une race en voie d'extinction partielle, le « pilote du dimanche », dont la joie réside dans les tours de piste et les courtes promenades aériennes aux alentours de l'aérodrome. Bien entendu, ces vols n'ont lieu que par beau temps et ils ne posent que des problèmes d'assistance mineurs. Nous ne nous étendrons pas sur cette question.

Toutefois, en quelques années, une évolution sensible s'est produite. L'activité globale de l'aviation de tourisme est, en France, passée de 370 000 à 587 000 heures de vol entre 1963 et 1967. Dans le même temps, le nombre des avions passait de 3 300 à 4 000, et la proportion du parc utilisée pour le voyage passait de 10 % environ à près de 50 %. Cet accroissement explosif continuera sans aucun doute au cours des prochaines années, et il faut s'attendre pour 1975 au million d'heures de vol.

Une telle mutation devait obligatoirement entraîner des difficultés de toute nature ; l'une des plus aiguës est d'ordre météorologique. L'avion léger est en effet relativement mal défendu contre le mauvais temps, et le problème du voyage se pose en des termes beaucoup moins favorables que pour l'aviation commerciale. L'avion léger ne possède pas, normalement, les équipements qui lui permettraient, comme aux avions commerciaux, de traverser les couches nuageuses sans visi-

bilité, d'atteindre une piste cachée par le brouillard, ou de neutraliser en vol les effets du givre. Il en résulte que le pilote doit éviter les formations nuageuses et rester pratiquement en vue du sol et en bonne visibilité. L'expérience montre que, dans la brume, sans repère visuel, le pilote perd en quelques minutes la notion de l'horizontale et devient incapable de contrôler l'attitude de son appareil.

Les ennemis météorologiques de l'avion léger sont variés et d'apparition assez fréquente, les plus spectaculaires n'étant pas forcément les plus dangereux. Les nuages d'orage, ou « cumulonimbus », par exemple, ne sont vraiment gênants que lorsqu'ils s'organisent en lignes de grains. Ils constituent alors une énorme barrière de pluie et de turbulence dont la traversée comporte des risques. Fort heureusement, les cumulonimbus sont souvent isolés, répartis au hasard, et séparés par des zones assez vastes de temps clair. Dans ce cas, ils sont visibles de loin, et donc faciles à contourner.

En fait, les conditions de vol les plus difficiles sont provoqués par ce que les pilotes nomment les « plafonds bas ». Lorsque le niveau de la base des nuages s'abaisse, l'avion de tourisme, obligé de voler en vue du sol, doit descendre de plus en plus. Il y a bien entendu une limite en dessous de laquelle le vol devient dangereux, limite qui dépend beaucoup de l'orographie. De l'ordre de 100 m au-dessus d'une plaine régulière, la limite doit être de plusieurs centaines de mètres au-dessus d'une région plus accidentée.

Les plafonds bas peuvent être liés, soit à une perturbation pluvieuse, soit à un nuage en forme de couche monotone que les spécialistes nomment « stratus ». Dans ces deux cas, il y a généralement diminution de la visibilité, les repères au sol deviennent délicats à identifier, et la navigation difficile. La couche nuageuse elle-même peut devenir indistincte et l'avion risque d'y entrer par mégarde.

Il est rare que de telles conditions apparaissent brusquement. La détérioration du temps est en général insensible, et cette particularité constitue souvent un piège, le pilote tendant à s'aventurer fort loin sous la nappe de nuages bas. Le retour, décidé trop tard, pose de tels problèmes que la seule issue peut être l'atterrissage en campagne, avec toutes les conséquences qui peuvent en découler.

Le brouillard est, lui aussi, un ennemi de l'avion de tourisme. Les bancs de brouillard sont étroitement liés au terrain. Ils se forment de préférence dans les vallées froides et humides. Certains sont tenaces et peuvent persister plusieurs jours. Les brouillards de printemps, par contre, formés pendant la nuit, se dissipent généralement sous les premiers rayons de soleil.

De nombreux phénomènes, sans constituer des dangers, ont une influence notable sur les conditions de vol. C'est le cas de la turbulence provoquée par les mouvements de convection ou le sillage d'obstacles variés au sol, phénomène propre aux basses couches de l'atmosphère. Il est généralement beaucoup mieux surmonté par les appareils modernes qui disposent d'une réserve notable de puissance motrice... que par leurs passagers.

Le vent, enfin, est un facteur important dont il doit être tenu compte dans la préparation de la navigation ; le calcul du cap que le pilote affichera sur le compas au cours du vol doit « intégrer » le vent. Lorsqu'il est fort et orienté en sens inverse de la route suivie, le vent peut augmenter sensiblement la durée du voyage. Des problèmes de consommation et d'escales intermédiaires peuvent se poser.

Il est donc très important pour le pilote d'être renseigné à l'avance sur tous les facteurs, vent, nuages, visibilité, phénomènes dangereux, qui peuvent affecter les paramètres du vol. Le but de l'assistance météorologique est de répondre d'une façon aussi complète que possible à ces questions difficiles.

Quelques heures, ou quelques minutes avant le décollage, le pilote prend contact avec le « prévisionniste » pour connaître les probabilités sur le parcours envisagé, soit directement, s'il existe une station météorologique sur l'aérodrome, soit, à défaut, par téléphone. La réponse du prévisionniste comporte en général deux parties distinctes : la première est la description synthétique précise de l'architecture présente et de l'évolution globale des grands systèmes nuageux. Cette description, forcément un peu abstraite, de la situation générale est essentielle, même pour un vol à courte distance. C'est en effet en fonction de la géographie mouvante de l'atmosphère autant que de la géographie immobile du terrain que la route devra être finalement déterminée.

Après cette partie purement technique, la consultation prend un caractère plus concret. Il s'agit de détailler, pour la route suivie, les conséquences les plus probables de l'évolution qui vient d'être décrite dans ses grandes lignes.

Le décollage ne met pas fin à l'assistance météorologique. Le développement des radiocommunications V.H.F. permet de maintenir un contact avec le sol et un certain nombre de stations radio sont équipées pour communiquer soit des observations, soit même des prévisions, aux équipages qui le demandent. Malgré leur nombre encore réduit, ces stations apportent une aide non négligeable à la navigation, notamment en cas d'évolution imprévue.

Jean BLANCHET

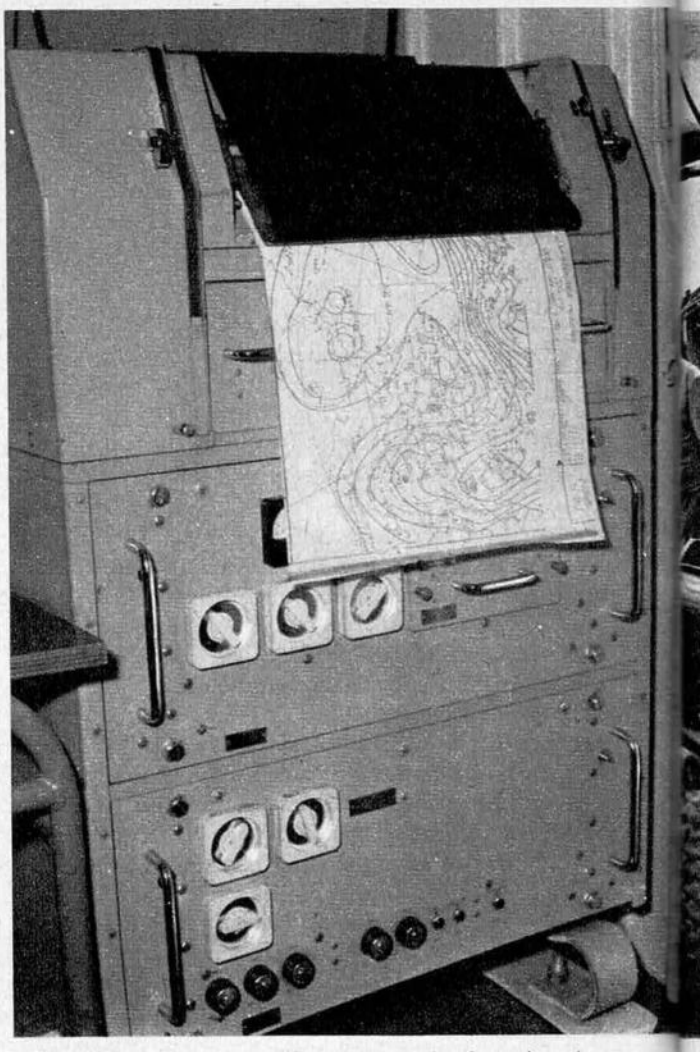
MARINE ET PÊCHE

L'assistance météorologique traditionnelle dont bénéficient tous les usagers maritimes est constituée par la diffusion de bulletins qui signalent les phénomènes météorologiques actuels et en prévision sur une zone déterminée.
Dans nos émissions nationales, on distingue : des **bulletins météorologiques spéciaux,** qui sont des avis d'alerte concernant exclusivement la force du vent, établis éventuellement à toute heure par les services météorologiques et transmis en clair dès réception par les stations radioélectriques ; des **bulletins réguliers** transmis à heures fixes, également en clair ; des **messages d'analyse** transmis sous forme chiffrée, et des **cartes élaborées** transmises par « radio-facsimilé ».
Les messages transmis en clair forment actuellement la plus grande partie de l'information destinée aux usagers non spécialisés. Ils concernent trois domaines.

- **Le domaine du grand large** qui couvre une grande partie de l'Atlantique et l'ensemble de la Méditerranée occidentale. Les bulletins réguliers comprennent un aperçu détaillé de la situation générale et des prévisions pour des zones géographiques déterminées ; ils sont plus particulièrement destinés aux navires de haute mer qui effectuent de grandes traversées ;

- **Le domaine du large** qui couvre le proche Atlantique, la Manche, la mer du Nord et une partie de la Méditerranée occidentale et est divisé en zones. Les bulletins réguliers comprennent un exposé succinct de la situation générale et des prévisions de zones; ils sont plus spécialement destinés aux pêcheurs ;

- **Le domaine de la côte,** constitué par une bande côtière d'une largeur de 20 milles marins fait partie intégrante de la zone du large correspondante ; la prévision tient cependant compte d'effets particuliers : brises, précipitations côtières, brumes du littoral. etc. Ces bulletins sont surtout destinés à la pêche côtière et aussi à la navigation de plaisance. Les messages d'analyse sont transmis par certaines stations en radiotélégraphie ou en radiotélétypie. Ils permettent, avec un certain entraînement, de reporter sur une carte les principaux éléments, chiffrés et codés, et de saisir d'un coup d'œil la situation météorologique d'ensemble et son évolution. De plus en plus nombreux sont les marins non spécialisés qui utilisent ces documents.



A bord du porte-avions Clemenceau, la réception des cartes de prévision transmises par radiofacsimilé.

Les cartes élaborées, enfin, sont transmises par radio-facsimilé, immédiatement prêtes pour l'exploitation à bord des navires dotés d'installations de réception convenables.

Le routage des navires

Ce concept, relativement récent, consiste en la recherche d'une route qui peut s'écarter notablement de la distance la plus courte entre port de départ et port d'arrivée, mais qui évite les zones de mauvais temps. Il peut finalement en résulter un gain de temps, une réduction des avaries occasionnées au navire et à sa cargaison, un meilleur confort des passagers. La première forme de navigation de ce type est la navigation climatologique qui permet d'éviter les zones où l'on risque de rencontrer, en telle saison de l'année, des conditions défavorables. La publication d'atlas, d'instructions

J. P. Bonnin

Les bateaux de pêche devront eux aussi s'équiper pour bénéficier d'une assistance météorologique en rapport avec les conditions souvent difficiles dans lesquelles ils opèrent.

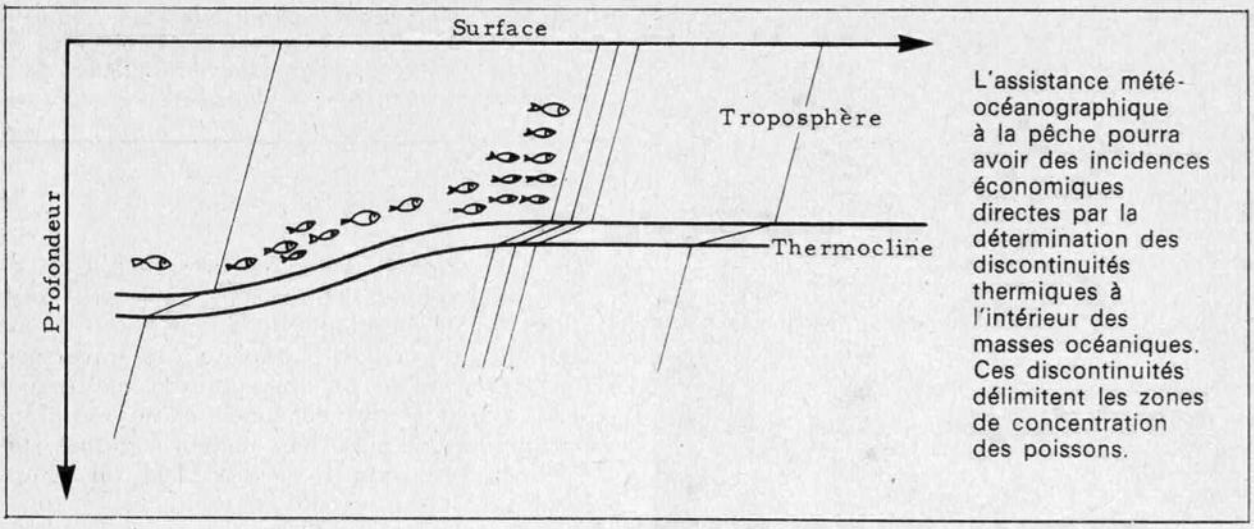
nautiques, de « pilot-charts », facilite le choix des commandants de navires.
La méthode utilisée dans les formes de routage plus élaborées consiste à construire, en fonction des prévisions à courte et moyenne échéance et des caractéristiques du navire, une « brachistochrone » (courbe de temps minimum) analogue à celle utilisée en aéronautique. En navigation maritime, l'élément déterminant de la vitesse du navire n'est pas le vent, mais l'état de la mer. Dans la pratique, le problème se complique du fait que la validité des prévisions à moyenne échéance est le plus souvent inférieure au temps de traversée. Le routage prévoit donc une option de route initiale, faite à partir des conditions prévues sur la première partie du trajet au moment du départ, et des options secondaires intervenant en cours de traversée.

Un cas particulier : les naviplanes

Une catégorie d'engins maritimes requiert une assistance particulière. Il s'agit des naviplanes. Ces unités assurent depuis peu des liaisons régulières, nombreuses durant la période estivale, en Manche et en Méditerranée. Ces engins relativement légers sont facilement sensibles au vent et à l'état de la mer.
Etant donné la faible ampleur des traversées, les prévisions nécessaires pour la haute mer sont à très courte échéance et se réduisent parfois, lors de situations météorologiques stables, en une simple reconduction du temps présent. Mais, près des côtes, dans les zones d'atterrage, les conditions peuvent être très instables. L'état de la mer à la côte résulte des effets combinés du vent, du courant (régulier ou de marée), de la hauteur et de la nature du fond, de la configuration du rivage... Il est donc indispensable que le spécialiste chargé d'élaborer les prévisions ait une connaissance approfondie des particularités météo-océanographiques des « terminaux » du naviplane dont il a à assurer la protection. Il faut s'attendre à ce que, dans l'avenir, des naviplanes de grandes dimensions, assurant des liaisons sur grandes distances, soient mis en service. L'application du routage à ces unités, qui, compte tenu de leur conception, resteront très sensibles à la mer et au vent, deviendra alors indispensable.

La pêche : des exigences croissantes

La météorologie est appelée à jouer un rôle particulièrement important dans le cadre de la pêche dite industrielle pour la protection des zones de pêche (rôle traditionnel) et pour la prévision du comportement du poisson.
Les bateaux de pêche sont les navires les plus manœuvrants qui soient, compte tenu de leur taille et de leur tonnage. Ils sortent en n'importe quelle période de l'année et dans n'importe quelle zone où se trouve le poisson. Si ces navires « étalent » remarquablement le mauvais temps, il vient toujours un moment où les conditions deviennent dangereuses pour mouiller les filets et hisser les prises (il est vrai que certains navires modernes, en particulier les chalutiers à pêche par l'arrière peuvent travailler par vent de 40 nœuds). On conçoit donc l'importance de la prévision météorologique pour un patron de pêche soucieux de la sécurité de son bateau et de l'établissement de plans de travail cohérents. Dans cet esprit, les bulletins météorologiques destinés à la pêche font désormais une grande place à l'exposé de la situation générale, en



L'assistance météo-océanographique à la pêche pourra avoir des incidences économiques directes par la détermination des discontinuités thermiques à l'intérieur des masses océaniques. Ces discontinuités délimitent les zones de concentration des poissons.

indiquant la valeur des centres bariques, leur déplacement, les secteurs de vent fort... Ces indications sont « parlantes » pour le patron-pêcheur qui garde ainsi mieux en tête l'image de la situation et de son évolution.

La généralisation de la diffusion par radio-facsimilé de cartes d'état et de température de la mer est également susceptible d'intéresser les pêcheurs, mais il faudra que les bateaux soient convenablement équipés.

En ce qui concerne le comportement du poisson, la température est importante. C'est aussi l'une des grandeurs les plus commodes à mesurer. Chaque espèce de poisson a une température, ou une marge de température, de prédilection. Cette connaissance doit s'exercer tant en surface qu'en profondeur, dans l'épaisseur de la troposphère océanique (couche dans laquelle la température reste constante ou décroît faiblement). La situation de la thermocline (discontinuité thermique séparant les eaux de la troposphère des eaux profondes) doit également être connue, les concentrations se faisant souvent à ce niveau. Le schéma page montre d'une manière schématique comment les discontinuités thermiques verticales, souvent appelées **fronts thermiques** par les océanographes, et les fortes discontinuités thermiques sensiblement horizontales peuvent constituer une véritable masse. Sur ce schéma, on a fait figurer les poissons au-dessus de la thermocline. Mais tout dépend de la température de prédilection de l'espèce considérée. Dans tous les cas, la thermocline joue un rôle de « plancher » ou de « plafond ».

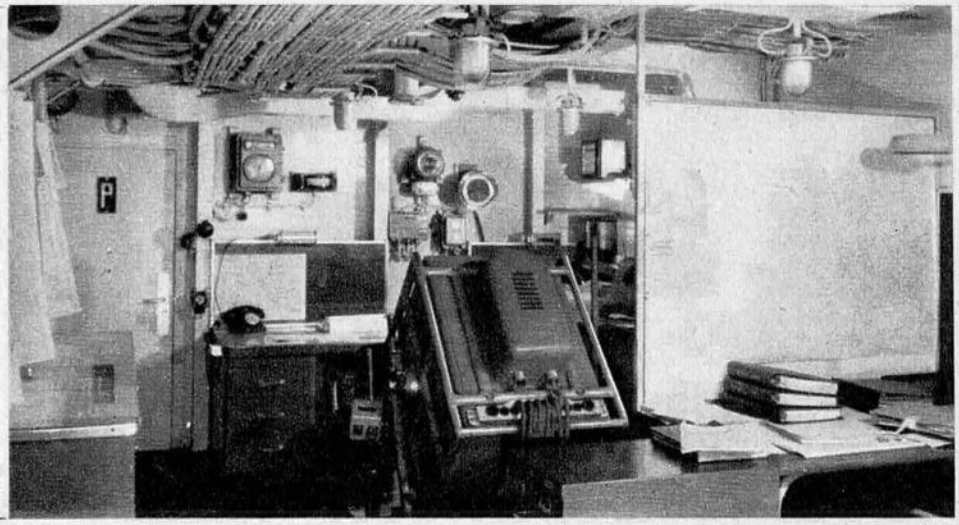
A partir de ces données, on entrevoit comment pourrait s'organiser une pêche scientifique mettant en œuvre les connaissances synoptiques et climatologiques de la température et des éléments influençant celle-ci : courants, insolation, « upwelling », etc..

C'est dans cet esprit qu'en 1969, à l'occasion de la campagne d'assistance à la flottille thonière, a été mis en œuvre, pour la première fois en France, un plan d'assistance et d'échange de l'information. Ce plan était articulé autour d'un navire d'assistance exploitant tous les renseignements reçus pour orienter la pêche de 40 thoniers-pilotes. Un des navires météorologiques stationnaires de l'Atlantique diffusait régulièrement des mesures bathythermiques à l'intention des thoniers et la Météorologie Nationale élaborait une prévision spéciale qu'elle communiquait au Centre de Recherche Opérationnel de Sauvegarde et de Sauvetage Atlantique (CROSSA) qui transmettait ses renseignements au navire d'assistance. Les thoniers pilotes eux-mêmes, équipés de thermomètres fournis par le Service Central Hydrographique, exécutaient des mesures météo-océanographiques transmises à ce navire.

Ainsi, la « pêche opérationnelle », basée sur une « météo-océanographie des pêches », entraîne le pêcheur français à se dégager peu à peu d'un individualisme profond et à s'orienter vers une conception plus moderne de son métier.

La Marine Nationale

L'assistance assurée par la Météorologie à la Marine Nationale procède surtout de la collaboration. La Marine, qui est pour une grande part à l'origine de notre organisation météorologique nationale depuis le 19e siècle, participe étroitement aux efforts déployés sur le plan des méthodes et des techniques. La Marine dispose d'ailleurs d'un personnel spécialisé et d'installations météorologiques importantes, telles celles fonctionnant au Centre d'Essais de Méditerranée, au Centre d'Essais des Landes, au Centre d'Expérimentation du Pacifique.



Pour répondre aux besoins des escadrilles embarquées, les porte-avions comportent de véritables centrales de météorologie. C'est le cas, ci-contre, pour le porte-avions « Foch », de construction récente.

L'assistance traditionnelle assurée par la Météorologie Nationale à la Marine se situe alors sur deux plans :

• **maritime,** pour répondre aux besoins courants de la navigation des bâtiments de guerre (mêmes informations que les navires marchands) ;

• **aéronautique** pour répondre aux besoins de l'Aéronavale (informations techniques dans les mêmes conditions que pour l'aéronautique en général).

Occasionnellement, l'assistance répond à des besoins particuliers : transferts outre-mer d'escadrilles de l'Aéronavale, croisières polaires de sous-marins, opérations amphibies, etc...

Deux domaines retiennent particulièrement l'attention de la Marine Nationale quant aux progrès techniques de la Météorologie :

• **la prévision des vagues :** le lancement de missiles à partir d'un sous-marin en plongée demande une connaissance précise de l'état de surface et de sa répercussion en profondeur ;

• **la température de la mer :** la connaissance de cet élément, en surface et en profondeur, revêt une grande importance sur deux plans : navigation sous-marine, car la densité (donc principalement la température) de la mer exerce une certaine influence sur la stabilité des submersibles, et pour la détection sous-marine, car la structure thermique de la mer conditionne la propagation des ultrasons.

Les travaux en mer

Les renseignements que la Météorologie Nationale fournit dans ces domaines concernent principalement deux catégories d'usagers : les industries pétrolières et les organismes chargés de l'aménagement du littoral.

Au cours de ces dernières années, la France s'est lancée dans la construction de plates-formes de forage pétrolier en mer. Ces installations sont très sensibles aux éléments et leur construction nécessite des calculs laborieux menés à partir d'éléments météorologiques statistiques.

En fait, l'assistance se fait en trois phases :

— fourniture de renseignements statistiques concernant les vagues (direction, amplitude, période) et le vent (direction, force, rafales) ; ces renseignements sont traités par des organismes spécialisés qui établissent les normes générales de construction de la plate-forme ;

— fournitures de conseils techniques en vue de la définition des appareils de mesures à installer à bord ;

— protection de la plate-forme, le personnel devant être évacué quand les conditions météorologiques atteignent certaines limites.

En échange, les pétroliers peuvent, en temps réel, en vue de la prévision synoptique, fournir des observations météorologiques exécutées à bord des plates-formes et mettre à la disposition de la Météorologie Nationale, pour ses propres études, des données recueillies sous forme enregistrée. Leurs plates-formes permettent aussi d'expérimenter divers instruments : capteurs, stations automatiques...

L'installation de ports, la pose de pipe-lines, la construction de phares posent également de gros problèmes dans lesquels le temps joue un rôle important.

Dans tous les cas, les travaux nécessitent d'abord une étude détaillée des conditions locales : vent, mer, courants, sédimentation... On procède souvent ensuite à une expérimentation sur maquette dans un laboratoire spécialisé.

Comme pour les plates-formes de forage, l'assistance comprend la fourniture de renseignements statistiques et celle de renseignements en temps réel en cours d'opérations.

J. ROMER - R. GELCI

ASSISTANCE AUX TRANSPORTS

Rail, route, rivières et canaux, ces trois modes de transport sont évidemment très affectés par les intempéries tant en ce qui concerne la sécurité que la rentabilité.

Les transports par voie ferrée

En ce qui concerne le rail, l'évolution des techniques d'exploitation, en particulier le développement de la traction électrique, tend à rendre moins pressants certains besoins. On se souvient des impératifs de protection contre le gel dans les dépôts de machines à vapeur. On se souvient aussi des convois avec locomotive supplémentaire pour remonter la vallée du Rhône lorsque le Mistral devait souffler en tempête. La signalisation toujours perfectionnée et l'automatisation progressive des manœuvres concourent aussi à rendre les transports ferroviaires moins vulnérables aux intempéries que les autres modes de transport, la route notamment.

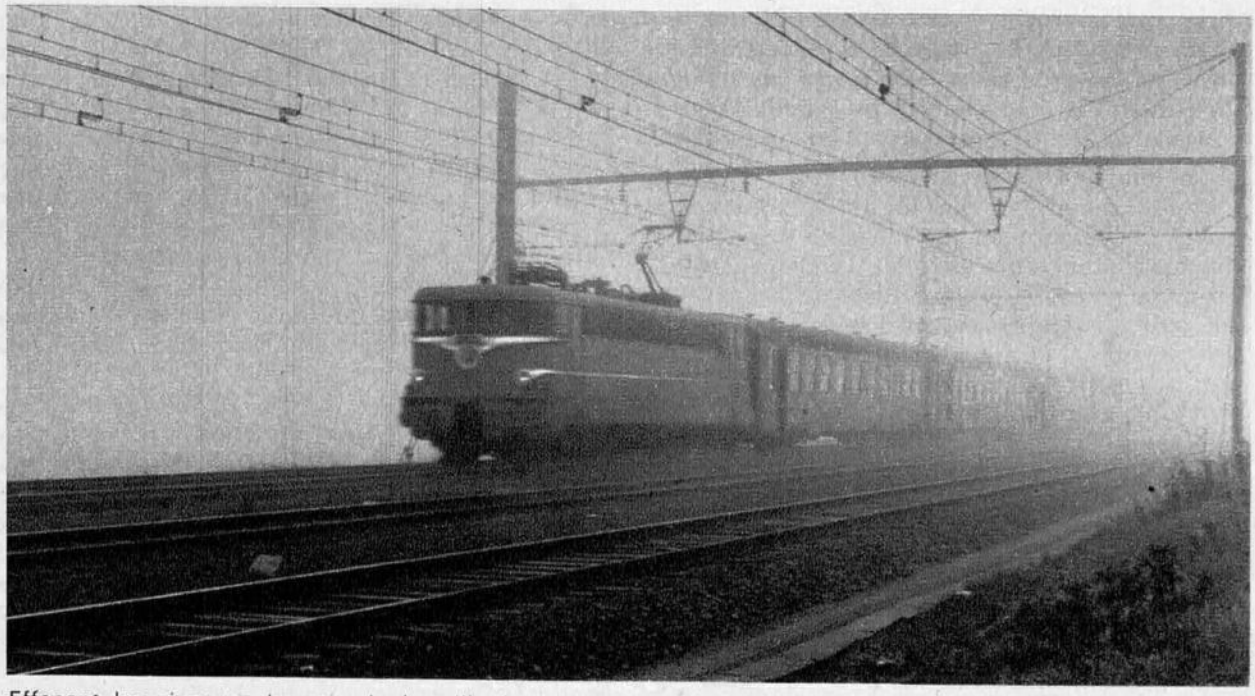
Néanmoins, on ne peut négliger totalement les intempéries, compte tenu des conséquences qu'elles peuvent avoir sur l'exploitation. Citons par exemple la neige et le verglas qui nuisent au bon fonctionnement des aiguillages et à la stabilité des caténaires, le brouillard qui efface la signalisation, la tempête qui peut provoquer l'arrachement des lignes électriques, téléphoniques, et des pylônes.

Il s'agit là essentiellement de phénomènes de la mauvaise saison. Mais d'autres, pouvant se produire à peu près toute l'année, ne sont pas moins dangereux. Ce sont en particulier les fortes précipitations, parfois à l'origine de glissements de terrain et d'obstructions des voies, les orages avec tous les risques de foudroiement qui en résultent. On peut penser aussi aux fortes chaleurs estivales qui provoquent une dilatation excessive des rails, laquelle n'est pas sans dangers.

Le concours de la Météorologie est assuré par la communication aux services de la S.N.C.F., tant sur le plan national que sur le plan régional, de bulletins de prévision quotidiens ou biquotidiens, par secteurs géographiques, pour les 24 ou 36 heures suivantes. Ces bulletins doivent permettre de décider de certaines actions préventives.

Pour compléter ce tableau, mentionnons les prévisions de température destinées à l'amélioration de la climatisation des voitures et à la préservation des installations sanitaires en périodes de gel.

L'annonce suffisamment à l'avance (quelques jours) d'une vague de froid constitue toujours une information précieuse. Elle permet en



Effaçant les signaux de voie, le brouillard peut menacer la sécurité et perturber l'exploitation ferroviaire.

J. P. Bonnin

Dans le développement du trafic routier pour le transport des marchandises, les conditions atmosphériques jouent un rôle important, pour la sécurité comme pour l'exploitation la plus économique.

particulier d'opérer la concentration des wagons nécessaires au transport du charbon et autres combustibles.

Les problèmes du réseau routier

On sait quelle place occupe la circulation routière dans les activités des pays développés, qu'il s'agisse d'activités commerciales, industrielles ou touristiques.

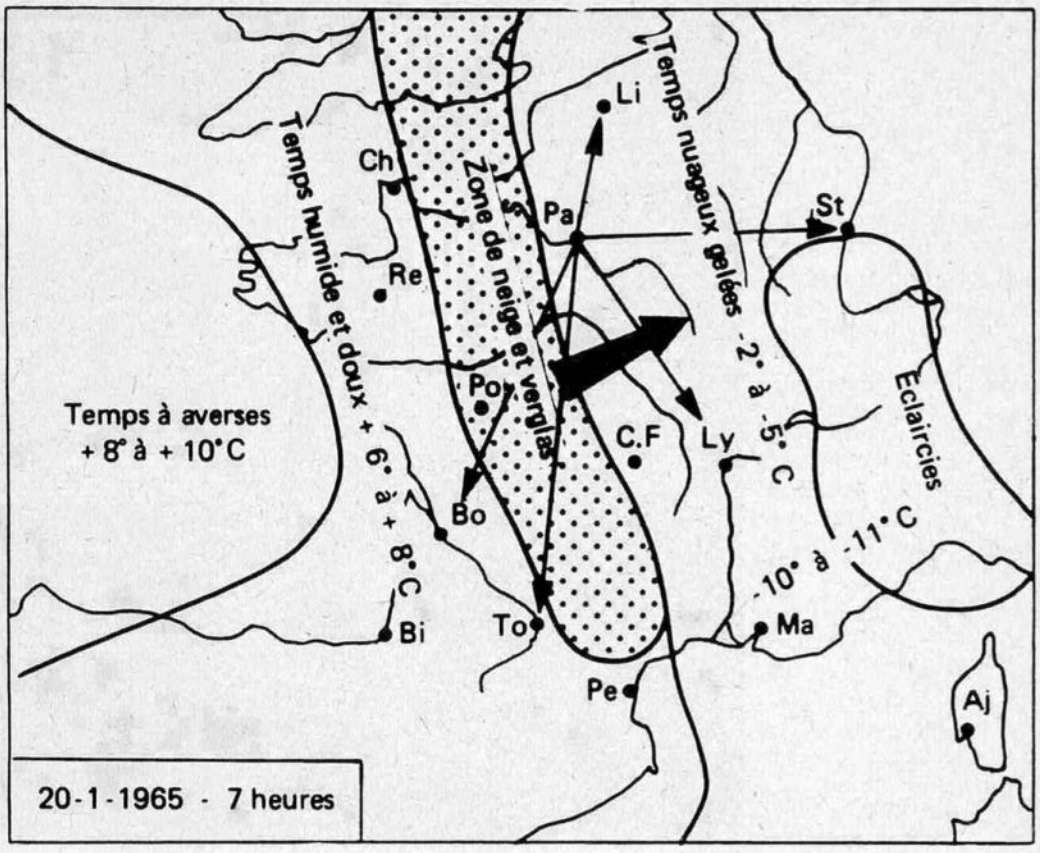
Deux problèmes se posent. Le premier concerne la sécurité en fonction des intempéries (neige, verglas, brouillard, tempête) qu'il s'agit d'affronter en connaissance de cause et avec les précautions indispensables.

Le second problème, plus spécialement posé aux transporteurs, est la détermination du trajet sinon le plus court, du moins le plus économique en fonction des obstacles résultant de conditions atmosphériques défavorables.

Pour parvenir à la solution de ces problèmes, sont établies chaque jour, du 1er novembre au 31 mars, des cartes d'intempéries et de températures interprétées en fonction de la situation météorologique générale et de son évolution. Le déplacement des zones peu praticables pour les usagers de la route peuvent être ainsi prévus avec des chances appréciables lorsque les échéances ne dépassent pas 24 à 36 heures. Un exemple choisi parmi beaucoup d'autres illustrera les possibilités de la météorologie dans ce domaine.

Dans la soirée du 19 janvier 1965, il était, compte tenu des éléments d'appréciation dont on pouvait disposer, possible de schématiser pour le lendemain 20 janvier, à 7 h et à 19 h, les positions prévues des différentes « zones de temps », notamment celles relatives aux intempéries les plus graves, en l'occurrence les chutes de neige et la formation de verglas. On pouvait alors conseiller utilement les usagers. Au départ de Paris, des voyages vers Lille et Strasbourg pouvaient être envisagés sous réserve d'un départ très matinal permettant de ne jamais être rattrapé par la zone dangereuse. Un voyage vers Lyon, malgré des conditions relativement favorables en premier lieu, deviendrait rapidement difficile en raison de la convergence du trajet et de la trajectoire de la zone d'intempéries ; de ce fait, le voyage était à déconseiller. Vers Toulouse et Bordeaux, un départ fortement retardé, laissant la zone d'intempéries se décaler nettement vers l'Est, pouvait par contre être suggéré, au même titre qu'un itinéraire contournant nettement le Massif Central par l'Ouest, en cas de nécesité absolue de départ matinal.

Pour l'établissement de cartes de ce type, l'information en provenance des stations du réseau est généralement insuffisante. Ces stations se trouvent trop fréquemment éloignées des grands axes routiers. La collaboration entre la Météorologie Nationale et les organismes collectant des informations sur l'état des routes



La collaboration de multiples sources de renseignements permet d'établir à l'usage de la circulation routière des cartes de déplacement des zones de temps prévu. Ainsi le 20 janvier 1965, il pouvait être conseillé aux automobilistes partant de Paris vers Bordeaux d'attendre le déplacement vers l'Est de la zone de mauvais temps prévue en début de matinée.

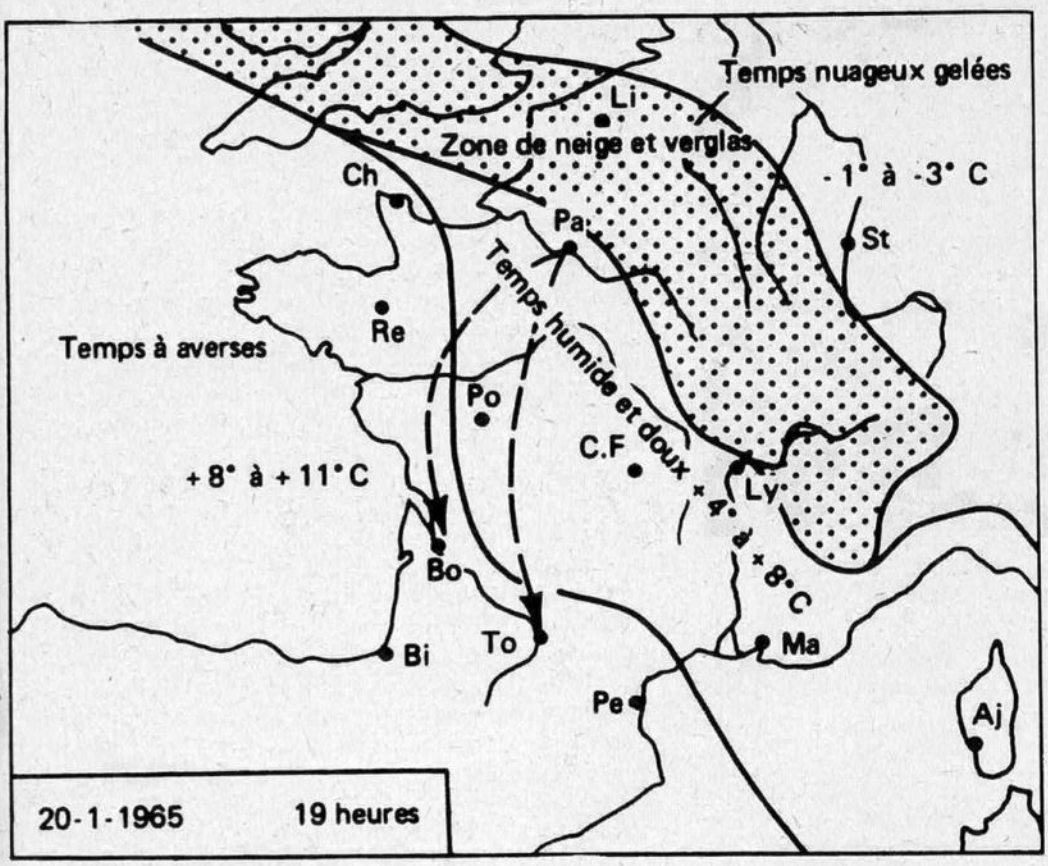
a permis de remédier en grande partie à cet inconvénient. En contrepartie des renseignements qu'ils recueillent, ces organismes (les Ponts et Chaussées, la Gendarmerie Nationale, les C.R.S., la Fédération nationale des clubs automobiles, le Touring-club de France) rereçoivent du Service central de la Météorologie ou de ses services régionaux des bulletins de prévision quotidiens ou spéciaux, principalement axés sur les brouillards, le verglas, la neige, et la tempête.

On ne saurait trop insister sur l'importance d'une prévision couvrant la durée du trajet routier. En effet, la seule information sur l'état des routes, aussi précise et aussi sérieuse qu'elle puisse être, ne peut suffire. Un trajet parfaitement normal à une heure donnée peut, dans les heures suivantes, devenir dangereux, voire impraticable. L'inverse peut également se produire. C'est pourquoi un effort important d'information, auquel participe activement la Météorologie, a été fait. De très nombreux messages, plusieurs milliers dans les périodes critiques, sont transmis et échangés chaque jour par télégrammes, par téléphone, radio, télétype, telex. Les échanges de renseignements s'effectuent aussi avec les pays limitrophes. On doit également mentionner l'installation progressive par les Ponts et Chaussées de « répondeurs automatiques » en des points du territoire particulièrement vulnérables aux intempéries. Sur simple appel téléphonique, l'automobiliste peut être informé de l'état local de la route et de l'évolution des conditions atmosphériques (prévue par le Centre météorologique régional le plus proche). Citons notamment les répondeurs de la Rochepot dans le département de la Côte-d'Or et ceux du col de la République, dans le département de la Loire.

Les transports urbains

Pour compléter cet aperçu des problèmes posés par les intempéries dans les domaines du rail et de la route, nous devons mentionner les transports urbains, trolleybus, autobus, autocars, tramways, lignes aériennes du Métropolitain...

Les difficultés rencontrées nécessitent de la part des Services de voirie des actions préventives rapides, toute interruption tant soit peu prolongée de la circulation dans les grandes agglomérations devenant rapidement préjudiciable à de nombreuses activités. On se souvient, dans un passé relativement récent, des chutes de neige qui s'étaient abattues sur la Région parisienne les 10 et 11 janvier 1966 et qui avaient provoqué de graves difficultés de circulation, dues au tassement de la couche de neige. De ce point de vue, la collaboration



A 19 heures, au cours de la même journée (20 janvier 1965), la situation se trouvait considérablement modifiée. Le mauvais temps intéressait essentiellement l'Est de la France. Un déplacement routier Paris-Lyon devenait dangereux ou pénible. Au contraire, les axes routiers de la partie Ouest du pays pouvaient être utilisés sans grands inconvénients probables.

qui s'est établie au cours des dernières années avec les services de la Météorologie nationale a certainement permis d'obtenir dans les périodes critiques de substantielles améliorations.

Les voies navigables

Les voies navigables, canaux et rivières, subissent, comme les autres modes de transport, les effets des intempéries.

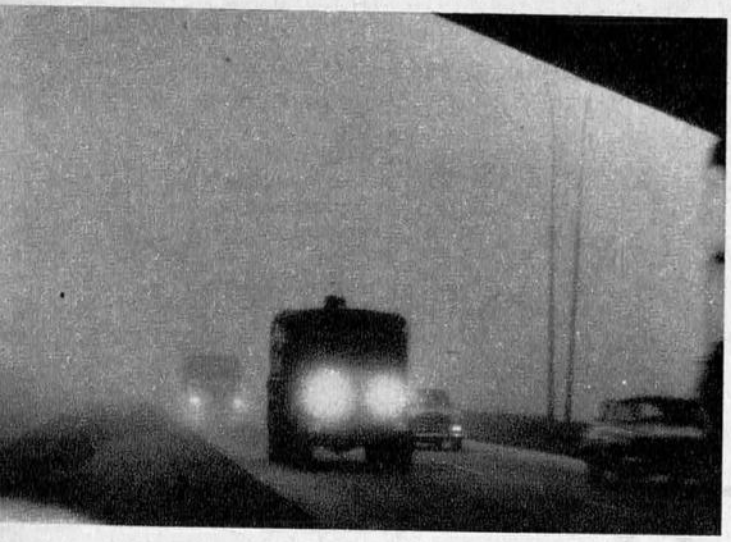
Il s'agit surtout du froid, lorsqu'il devient suffisamment intense pour provoquer la formation de glaces plus ou moins compactes, et des fortes pluies qui peuvent engendrer des crues importantes. Mais, le phénomène opposé intervient aussi. C'est la sécheresse caractérisée, qui conduit à des étiages incompatibles avec une navigation normale. Enfin, les brouillards denses et persistants sont particulièrement dangereux en raison des risques de collisions.

L'augmentation du trafic fluvial, la remise en état de nombreux cours d'eau et canaux, leur transformation au gabarit international, la création (en cours ou escomptée) de nouveaux ensembles (jonctions Manche-Méditerranée et mer du Nord-Méditerranée constituant le projet appelé « en Y »), ne peuvent qu'entraîner une intensification des transports par voies navigables et une plus grande importance accordée aux prévisions météorologiques.

En ce qui concerne le gel, les canaux sont les voies les plus sensibles, surtout ceux du Nord, de l'Est et du Centre.

Cinq journées de gel continu, la température quotidienne moyenne ne s'élevant pas au-dessus de — 5 °C, conduisent généralement à la formation de glaces plus ou moins étendues. Pour obtenir le même effet sur les rivières, dix jours seraient nécessaires. Un exemple typique est celui de la vague de froid qui a déferlé sur l'Europe occidentale et sur le Bassin Méditerranéen le 22 décembre 1962. Le rôle de la Météorologie avant le déclenchement de cette vague et durant tout le temps qu'elle a sévi a été très important. Des contacts étroits ont été maintenus avec les services officiels (Direction des Carburants et des Charbonnages, Office de la navigation intérieure) et privés (transporteurs, exportateurs, importateurs etc.).

En ce qui concerne les fortes précipitations génératrices de crues, voire d'inondations, aggravées en certaines régions par la fonte des neiges, le problème a été examiné au chapitre précédent, mais certains aspects économiques défavorables des étiages doivent être précisés. Une navigation fluviale normale nécessite des hauteurs d'eau, donc des débits, en rapport avec le tirant d'eau des péniches. Il doit être aussi tenu compte de l'existence de certains



Retards, risques d'accidents, autant de conséquences possibles du brouillard s'il couvre les axes routiers.

Les crues peuvent entraîner l'immobilisation de centaines de péniches aux écluses ou dans les ports.

J. P. Bonnin

hauts-fonds. Ainsi se pose un problème supplémentaire, celui du chargement des convois. (Pour les grandes péniches de 38,50 m se dirigeant du Nord vers le Rhône, un allègement de la cargaison de 1,8 t permet de gagner 1 cm de tirant d'eau.)

Il serait en effet très onéreux d'avoir à décharger tout ou partie de la cargaison pour permettre le franchissement de zones où les hauteurs d'eau sont devenues insuffisantes, ou d'avoir recours, pour pallier la défaillance de la voie navigable, à la route ou à la voie ferrée. Encore faut-il adopter les procédures convenables avec assez d'avance sur le phénomène lui-même. Le recours aux prévisions météorologiques à courte et à moyenne échéance permet, dans bien des cas, de réduire au minimum les inconvénients relatifs aux étiages anormaux.

Une expérience intéressante d'utilisation des informations météorologiques dans le domaine de la navigation fluviale mérite d'être mentionnée. Il s'agit, dans le cadre de l'exploitation des barrages-réservoirs construits sur le bassin de la Seine en amont de Paris (Crescent, sur la Cure, 1932 ; Chaumeçon, sur le Chalaux, 1933 ; Champaubert, sur la Marne, 1938, en cours d'agrandissement ; Pannecière, sur l'Yonne, 1949 ; Lusigny, sur la Seine, 1966-1968), de l'exploitation particulière du barrage Seine, à Lusigny, d'une capacité de 205 millions de mètres cubes. On en espère un abaissement des crues à Paris de l'ordre de 40 cm et un renforcement des débits d'étiage de 20 à 35 m^3 par seconde.

On conçoit que les manœuvres, à court, moyen, et long terme, relatives au barrage-réservoir, soient extrêmement complexes compte tenu de la diversité des effets pouvant être obtenus et de l'antagonisme qui, parfois, les caractérise. Maintenir par exemple des niveaux élevés à la fin de l'hiver assurera la possibilité de pallier une sécheresse ultérieure préjudiciable à la navigation, mais ne permettra pas l'écrêtement d'une crue tardive. La manœuvre inverse sera nettement défavorable à la navigation, en cas d'évolution vers une sécheresse caractérisée.

A ces options à long terme, auxquelles les prévisions météorologiques sont associées dans la mesure où l'échéance d'un mois s'avère suffisante, s'ajoutent pour la meilleure exploitation du barrage des prévisions à court et moyen terme. Celles-ci portent sur les quantités de précipitations prévues et sur l'évolution de la température. Elles se sont révélées intéressantes et l'expérience se poursuit. Sans pouvoir être chiffrée, la rentabilité de l'assistance météorologique dans ce domaine apparaît dès à présent certaine.

P. FONTAINE

G. H. Levêque

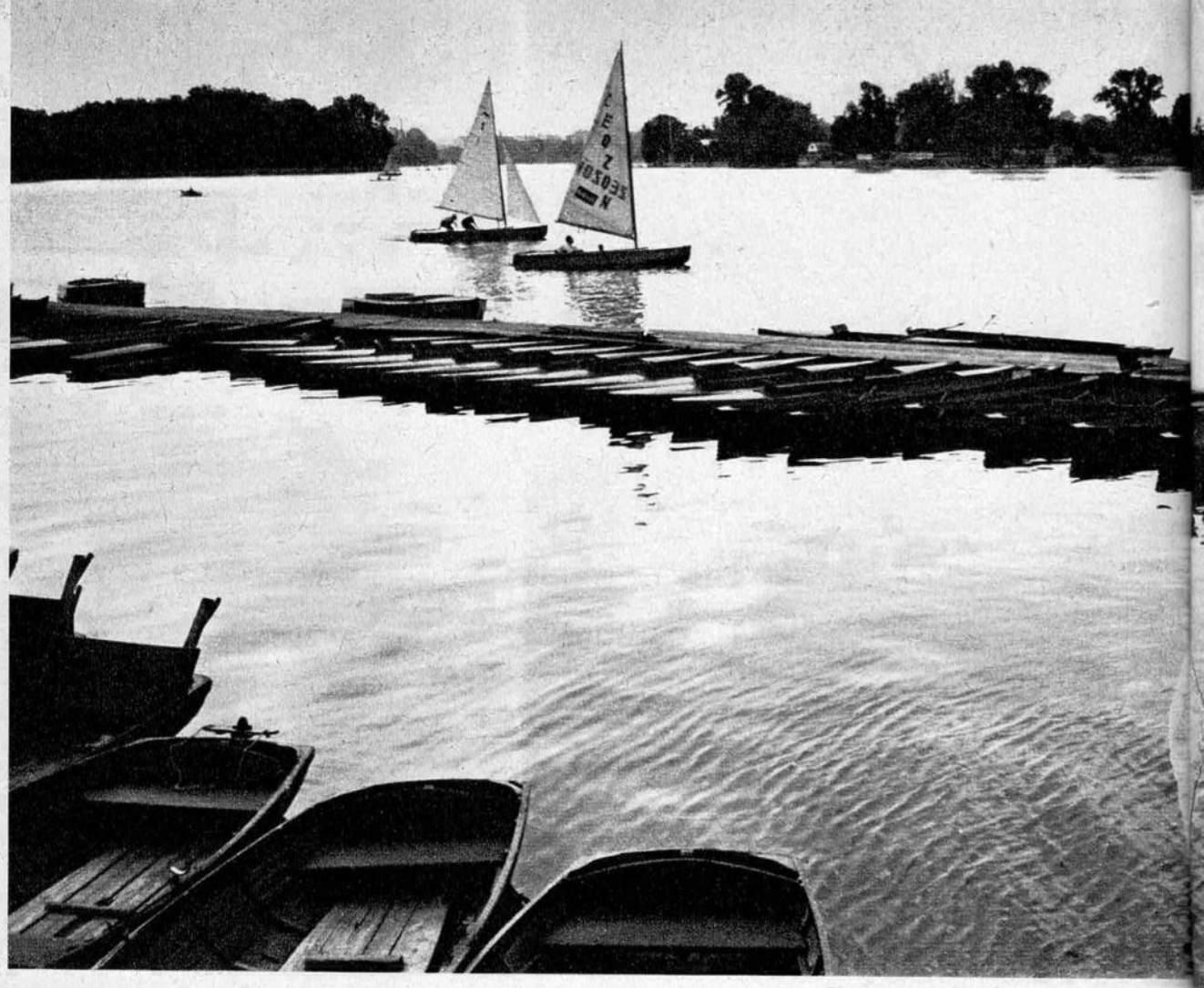
NAVIGATION DE PLAISANCE

Les sports nautiques prennent une place de plus en plus grande dans les loisirs. Le nombre des bateaux de plaisance (voiliers et bateaux à moteur) dépasse déjà 200 000, l'accroissement annuel de la flotte étant de quelque 25 000 à 30 000 unités. Aux dangers de la mer que connaissent bien les navigateurs avertis viennent ainsi s'ajouter les risques dus à une plus ou moins grande inexpérience. Les services auxquels incombe la sécurité de la plaisance sont attentifs à ce problème.

La Météorologie, pour sa part, était déjà organisée pour fournir aux marins et pêcheurs les renseignements qui leur sont nécessaires, mais ces informations destinées à des professionnels n'étaient pas adaptées aux besoins des plaisanciers. L'écoute des émetteurs transmettant les bulletins pour le large ne pouvait être acquise que par les navigateurs disposant de récepteurs spéciaux. Les bulletins pour la côte ne contenaient que des renseignements succincts et limités à une zone correspondant à la portée des émetteurs. Enfin, lorsque, par négligence, oubli ou toute autre cause, le plaisancier n'avait pas écouté le bulletin avant de s'embarquer, il partait sans autre idée sur le temps et l'état de la mer que celle qu'il pouvait se faire en interrogeant le ciel et les vagues. On a donc été conduit à organiser un système permettant, d'une part, une audition commode de bulletins complets adaptés aux plaisanciers et, d'autre part, des moyens de rattrapage pour le cas où le dernier bulletin n'aurait pas été reçu avant l'appareillage.

Les bulletins pour la plaisance

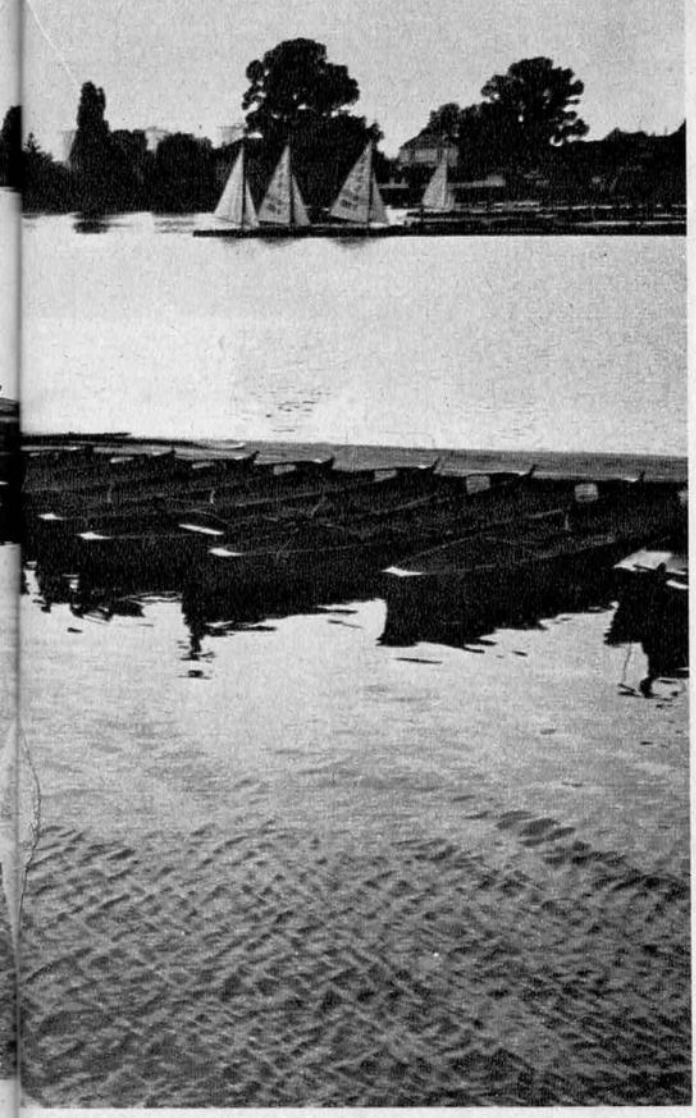
Depuis quelques années, la Météorologie Nationale et l'O.R.T.F. ont organisé la diffusion par France-Inter (grandes ondes, 164 kHz, 1 829 m), deux fois par jour, d'un bulletin spécial pour la plaisance pendant la période



d'été : pendant les week-ends du 1er avril à la fin mai et du 15 septembre à la fin septembre ; chaque jour du 1er juin au 15 septembre. Le bulletin du matin, diffusé vers 9 h légales, signale, en tête (avec répétition à la fin), les avis de coup de vent (plus de 35 nœuds, soit environ 65 km/h) et de tempête (plus de 48 nœuds, soit environ 90 km/h). Est donnée ensuite une description succincte de la situation au moment du dernier réseau d'observation (1 h), une précision valable pour la journée et une indication pour la nuit suivante dans les zones fréquentées par les plaisanciers. Le bulletin est complété par des observations locales (en général de sémaphores) faites à 7 h.

Le bulletin du soir, diffusé vers 20 h, est plus sommaire : il comporte un aperçu de la situation générale et de son évolution pour les 36 heures à venir (48 heures, le vendredi). Depuis août 1969, des dispositions complémentaires ont été prises pour tenir les plaisanciers informés des modifications imprévues du temps survenant entre les bulletins. Un rendez-vous à heure fixe (après les informations de 14 h) confirme par un bref communiqué les traits essentiels des bulletins du matin ou énonce les modifications à y apporter. D'autre part, à chaque tranche horaire d'informations, la Météorologie peut faire diffuser des « flash » attirant l'attention sur tout événement important, en cours ou prévu. La période de la diffusion des trois bulletins quotidiens a été allongée (15 mai-31 octobre).

Ce système à lui seul pourrait couvrir tous les besoins de la plaisance pendant la période estivale. Cependant d'autres sources de renseignements sont en permanence à la disposition des navigateurs. Il s'agit des bulletins côtiers, diffusés par les émetteurs régionaux de l'O.R.T.F. (matin, midi et soir), qui contiennent un bref aperçu de la situation, le temps observé quelques heures auparavant et une prévision valable pour 36 heures concernant une bande de 20 miles à partir des côtes. Il existe aussi des bulletins pour le large, diffusés matin et soir par les stations côtières des P. et T. (Boulogne, Le Conquet, St-Nazaire, Arcachon, Marseille, Grasse) et par Radio Monte-Carlo. Sauf en ce qui concerne ce dernier émetteur, la diffusion est assurée sur la « bande marine » (ondes métriques) que les récepteurs du commerce ne peuvent pas tous capter.



J. P. Bonnin

Il convient d'insister sur l'intérêt de cette source d'information permanente, dont les bulletins sont très complets et spécialisés. Elle permet, d'autre part, d'être informé à chaque demi-heure (H + 03 et H + 33) des avis de tempête en cours ou prévue. En cas de temps douteux, c'est une information précieuse. Les avis de tempête, rédigés par les stations météorologiques proches des émetteurs, sont diffusés en priorité par cette voie. A notre avis, tout navigateur, surtout à la voile, qui s'éloigne à plus de 20 milles des côtes aurait intérêt à s'équiper pour recevoir ces émissions.

L'information à terre

Avant d'entreprendre une croisière, une course ou même une simple promenade, il est nécessaire, ne serait-ce que pour prendre sa décision, que le plaisancier connaisse le temps prévu. Les bulletins radiodiffusés devraient certes couvrir tous les besoins, y compris l'information à terre, mais l'expérience montre qu'il n'en est pas ainsi. La seule solution paraît être de faire afficher dans chaque port de plaisance le texte des bulletins radiodiffusés et des avis de coups de vent et de tempête parvenus entre ces bulletins. Pour simple qu'elle soit, cette procédure soulève des difficultés qui tiennent davantage à une certaine incompréhension, voire à une certaine négligence de la part des intéressés. Il est vrai que les petites sociétés nautiques ne disposent ni de gros crédits, ni de personnel disponible en permanence : on veut profiter de ses vacances et naviguer au maximum, et non pas assurer, une fois par mois (s'il n'y a que trente bateaux dans le port), une permanence profitable aux vingt-neuf autres plaisanciers ; ceci, à supposer qu'il n'y ait qu'une personne embarquée par bateau ; le plus souvent, cette permanence pourrait être deux ou trois fois moins fréquente. Une telle entraide pourrait, chaque année, sauver la vie, ou pour le moins, éviter de sérieuses difficultés à de nombreux plaisanciers.

Le constat de carence enregistré jusqu'ici a contraint ceux qui ont la charge de la sécurité à organiser des systèmes complémentaires d'alerte ou d'information, lourds et nécessairement incomplets. Trente stations météorologiques du littoral tiennent à la disposition des usagers le texte des derniers bulletins diffusés, soit à l'occasion de visites à la station, soit par téléphone. Pour pallier l'encombrement des services de prévision du fait de très nombreuses demandes, certaines stations sont dotées de répondeurs téléphoniques automatiques, dictant sur simple appel le texte du dernier bulletin. Des organismes officiels, bureaux de ports, quartiers maritimes, affichent également les textes.

En ce qui concerne les phénomènes dangereux annoncés entre les bulletins, un système d'alerte est en voie d'organisation par une collaboration étroite entre diverses administrations (Météorologie, Marine marchande, Gendarmerie, Protection civile.).

Mais, en tout état de cause et quels que soient les moyens mis en œuvre, pourra-t-on jamais toucher vraiment tout le monde, en toutes circonstances ? Qui préviendra le navigateur qui fait escale sur un îlot, dans une crique, dans un port où nul corespondant ne peut être touché s'il n'écoute les bulletins radiodiffusés ?

C'est, au total, non seulement l'accroissement du nombre des unités qui pose des problèmes d'information, mais aussi celui de la multiplication des ports et abris. L'organisation d'un système d'information dans tous les ports peut paraître quelque peu astreignante, mais la recherche d'un bateau égaré ou en perdition est coûteuse, et la vie, même celle d'autrui, vaut encore bien davantage.

Roger CLAUSSE

LA MONTAGNE

C'est dans les régions montagneuses que la prévision des phénomènes météorologiques rencontre le plus de difficultés. Les perturbations qui se heurtent aux obstacles naturels ralentissent leur course en intensifiant leurs effets. Vents, nuages, pluies redoublent sur les versants au vent, s'engouffrent dans les cols ; les vents redescendent le long des versants opposés en dissolvant les nuages et en créant des tourbillons, pour recondenser leur eau à l'ascension du pic ou du massif suivant. Les orages montent soudain à l'assaut des cimes alors que le temps reste serein dans la plaine et, inversement, le soleil brille parfois à haute altitude alors que, quelques centaines de mètres plus bas, une mer de nuages entoure les massifs.

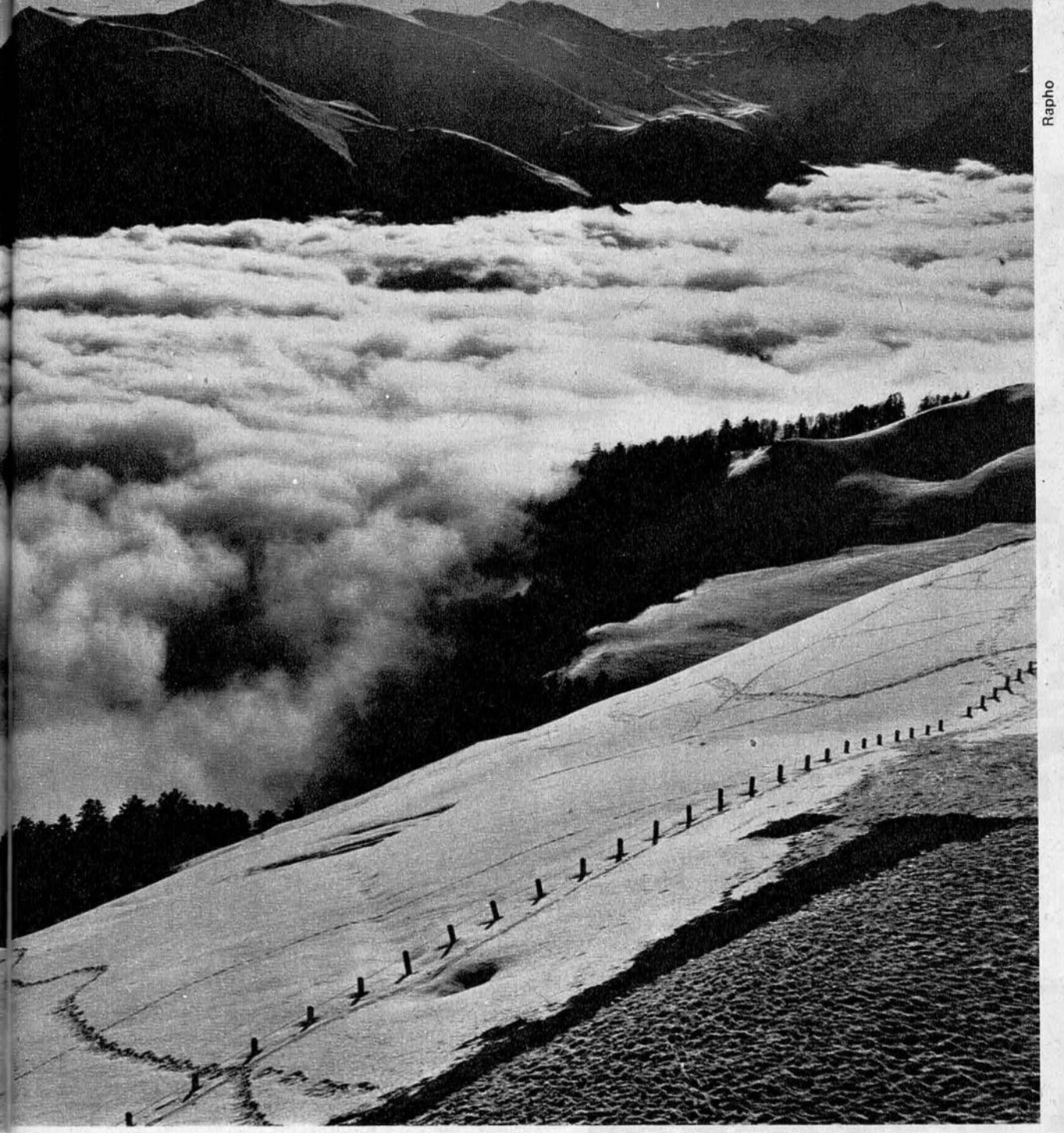
Des règles, certes, il en existe : les lois de la physique, de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, s'appliquent ici comme partout, mais les variables sont si nombreuses qu'elles se chiffrent par millions pour un seul massif : pentes, exposition, couverture du sol, effets de brise, en chaque point, à chaque niveau.

Pour l'alpiniste ou le touriste, ce qui importe, c'est le temps qu'il rencontrera dans un domaine bien délimité s'étendant sur quelques centaines de mètres ou, au plus, quelques kilomètres ; c'est la limite inférieure ou supérieure des nuages ; ce sont les risques d'orage, d'avalanche, de chute de neige, de verglas ; c'est également l'altitude au-dessus de laquelle règnent des froids intenses.

C'est donc une prévision fine qu'on attend, encore compliquée du fait que chacun des risques précités présente une importance et un degré de gravité différents suivant qu'on est alpiniste confirmé, touriste supputant les chances de faire une excursion en haute montagne, ou skieur limitant son activité aux pistes balisées d'une station. Pour y parvenir, ou plutôt pour approcher la solution de ce problème aux innombrables équations, le chemin est difficile. Les météorologistes n'en ont pas moins accepté l'escalade.

La première opération consiste à étudier les réactions du relief local sur les divers types de temps. C'est un travail d'observation et d'enregistrement des conditions atmosphériques en de nombreux points de chaque massif qui permet des études statistiques de climatologie et de météorologie dynamique. C'est, inconsciemment, ce que fait le montagnard qui, parfois, peut dire qu'à tels indices, le temps évoluera de telle façon. Certes, la tradition ou l'empirisme peuvent être infirmés par les faits. Des données quantitatives doivent intervenir et des traitements mathématiques affiner ou nuancer un tel matériel brut.

Avant toute étude de météorologie en montagne, il est donc nécessaire d'établir un réseau d'observation aussi dense que possible. Le service météorologique ne dispose, pour l'ensemble du territoire, que d'une centaine de stations d'observations, dont une dizaine sont installées dans les régions de montagne. Pour pallier cette insuffisance, on a recours à

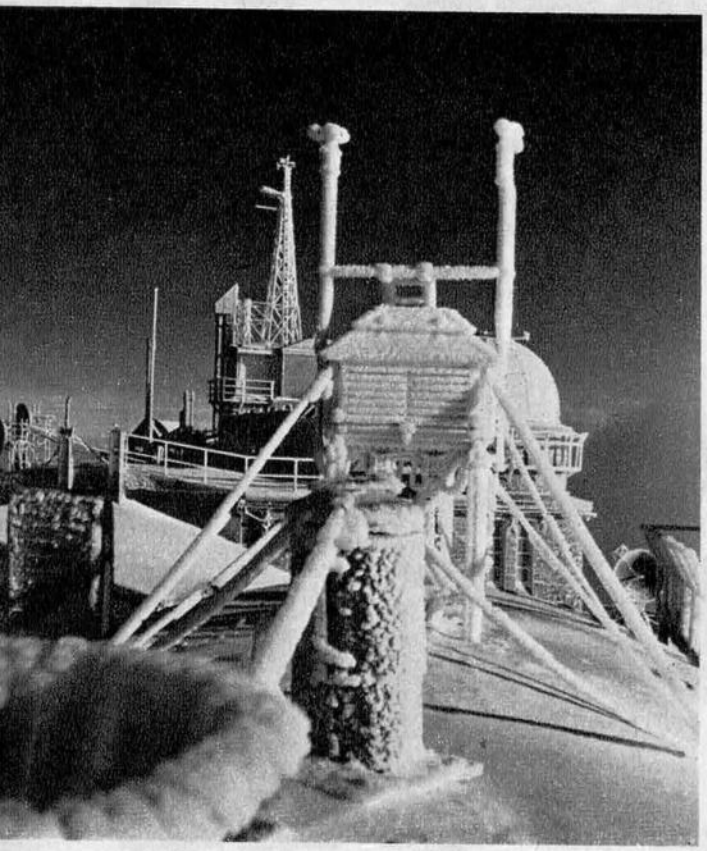


Rapho

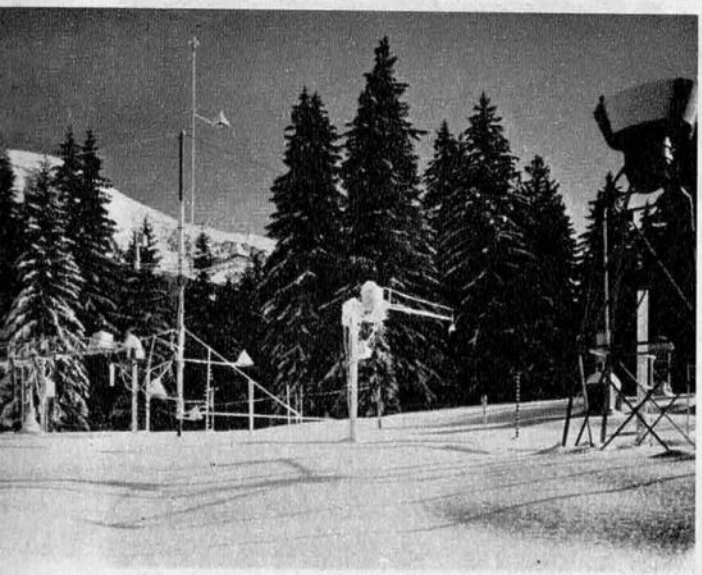
des observateurs auxiliaires (gendarmes, agents des Eaux-et-forêts...) qui effectuent des relevés un certain nombre de fois par jour. La densité de ce réseau croît peu à peu en fonction des moyens disponibles. Un effort particulier a été accompli lors des Jeux Olympiques de Grenoble. Mis en place quelques années avant les Jeux, ce réseau a permis des études poussées du climat de la région et l'élaboration de prévisions adaptées à celle-ci. Simultanément, une station spécialisée dans les problèmes de montagne avait été installée à Grenoble, avec des « antennes » dans les stations olympiques, pour renseigner le Commissariat général et les responsables sportifs sur les conditions atmosphériques.

Le succès de cette opération a incité à poursuivre l'effort pour l'assistance aux usagers de la montagne ; le réseau d'observation autour de Grenoble a été maintenu ; des installations complémentaires ont été implantées dans la région de Chamonix ; d'autres figurent dans les plans de la Météorologie Nationale.

Mais il convient de remarquer que, du fait même du climat, les procédés de mesure météorologique en montagne diffèrent souvent de ce qu'ils sont en plaine ; les anémomètres et les girouettes, bloqués par le givre, restent



Ce document illustre les difficultés propres à la météorologie en montagne. Les conditions de climat, la formation de givre en particulier, peuvent affecter le fonctionnement des appareils de mesure.



Quelques stations spécialisées se consacrent essentiellement à l'étude de la neige. C'est le cas du Centre d'études installé au Col de Porte (ci-dessus), dans le Massif de la Grande-Chartreuse, vers 1 300 m.

immobiles ; la neige qui tourbillonne ne pénètre pas dans les pluviomètres ; les abris météorologiques, à l'intérieur desquels les conditions doivent être immuables, sont ensevelis sous la neige ou si proches du manteau neigeux que les mesures sont faussées par des rayonnements parasites.

La mise au point de matériels spéciaux est donc indispensable. Malgré les progrès réalisés, tous les problèmes posés dans ce domaine ne sont pas encore résolus d'une manière satisfaisante, notamment en ce qui concerne la mesures des quantités de neige.

Des mesures spéciales concernant la neige doivent d'ailleurs être pratiquées, notamment pour la prévision des avalanches. Les recherches dans ce domaine sont assurées par le Centre d'étude de la neige de la Météorologie installé à Grenoble (St-Martin d'Hères). Dans ses laboratoires du col de Porte et de Chamrousse (en construction) sont mesurés régulièrement les températures de la neige, du sol et de l'eau, l'humidité, le vent (à quatre

J. P. Bonnin

niveaux au-dessus de la neige), les précipitations solides et liquides, la valeur en eau du manteau neigeux, le rayonnement global incident et réfléchi, le tassement de la neige. Des observateurs auxiliaires effectuent d'autre part des mesures par sondage, battage et carottage qui permettent de connaître l'état et la structure interne du manteau de neige en de nombreux points.

A côté de ce centre est installée une « antenne » du centre météorologique régional de Lyon-Bron, spécialisée dans les problèmes de météorologie en montagne. Elle a la charge d'exploiter les données complémentaires (du réseau de montagne, des sondages-battages) et les mesures assurées par le Centre d'étude de la neige en vue d'adapter aux massifs montagneux les prévisions générales reçues de Paris et de Lyon.

Une expérience a, d'autre part, été réalisée au cours de l'été 1969 à Chamonix-Mont-Blanc : un ingénieur spécialiste des questions de montagne a été détaché dans cette station ; un système de mesures dans la vallée et en altitude avait été préalablement implanté. L'ingénieur disposait, en outre, d'informations générales reçues du Service central de Paris (par radio-facsimilé), et du centre régional de Lyon (par téléphone). A l'aide de ces informations et de l'expérience acquise sur place, on a pu renseigner avec succès les usagers de cette région.

Il convient de signaler que ces expériences très localisées ne peuvent être étendues, en l'état actuel des choses, à tous les massifs, en raison de l'effort important que réclame l'implantation de stations d'observation, les études de sites, les moyens de transmission, les effectifs, compte tenu de la diversité des reliefs et de leur couverture.

Un point est cependant acquis : la Météorologie Nationale s'est attaquée au problème de l'assistance à la montagne. Comme partout ailleurs, les progrès de cette entreprise seront fonction des moyens disponibles.

Roger CLAUSSE

PEUT-ON AGIR SUR LE TEMPS ?

Il convient de marquer dès l'abord la faiblesse déconcertante des moyens humains vis-à-vis des énormes énergies mises en jeu dans les manifestations du temps.

Les lois physiques, mécaniques, thermodynamiques qui régissent l'ensemble des phénomènes météorologiques doivent être considérées à leur juste dimension et il est utile de fixer quelques ordres de grandeurs concernant l'immense machine à vapeur matérialisée par la Terre et son atmosphère, qui reçoit toute son énergie du Soleil.

L'énergie reçue par le sol horizontal sous forme de rayonnement dépend de la latitude, de la saison, de l'heure de la journée, de la nébulosité, de l'altitude, des poussières atmosphériques et d'autres facteurs secondaires. On peut donner les valeurs suivantes, exprimées en watts (W) pour les puissances et en joules (J) pour les énergies :

— par ciel clair, vers midi, dans les régions tempérées : environ 1 000 W par mètre carré en été (hauteur du Soleil de 60°) et 250 W par mètre carré en hiver (hauteur du Soleil de 15°) ;

— par ciel complètement couvert, ces puissances sont en moyenne divisées par 4, alors qu'elles ne sont réduites que de 30 % environ pour une nébulosité moyenne.

A ces éclairements correspondent les énergies horaires suivantes, exprimées en kilojoules par mètre carré, pour nos latitudes, toujours vers midi :

— par ciel clair : de 1 000 kJ par mètre carré en hiver à 3 500 kJ par mètre carré en été ;

— par ciel couvert : de 250 kJ par mètre carré en hiver à 1 000 kJ par mètre carré en été.

Les sommes quotidiennes s'échelonnent, en tenant compte des variations de la hauteur du soleil et des différentes durées du jour, de 500 kJ par mètre carré en hiver par ciel couvert à 32 000 kJ par mètre carré en été par très beau temps, avec une valeur moyenne annuelle de 10 000 kJ par mètre carré en climat tempéré.

En complément à ce rayonnement de courtes longueurs d'onde, le sol reçoit de l'atmosphère un rayonnemet de grandes longueurs d'onde dans l'infrarouge lointain, fonction de la répartition verticale en altitude de la température et de l'humidité, mais aussi et surtout du type et de la quantité de nuages présents.

Le sol émet lui-même un rayonnement propre, surtout fonction de sa température, et le bilan radiatif terrestre au sol (différence entre le flux émis par le sol et celui qui lui parvient de l'atmosphère), peut prendre toutes les valeurs comprises entre une valeur voisine de 0, par ciel couvert, et — 150 W par mètre carré par ciel clair, sec et pur. La perte énergétique du sol peut exceptionnellement atteindre 15 000 kJ par mètre carré et par 24 heures en zone désertique. Elle reste en moyenne de l'ordre de 5 000 kJ par mètre carré et par 24 heures.

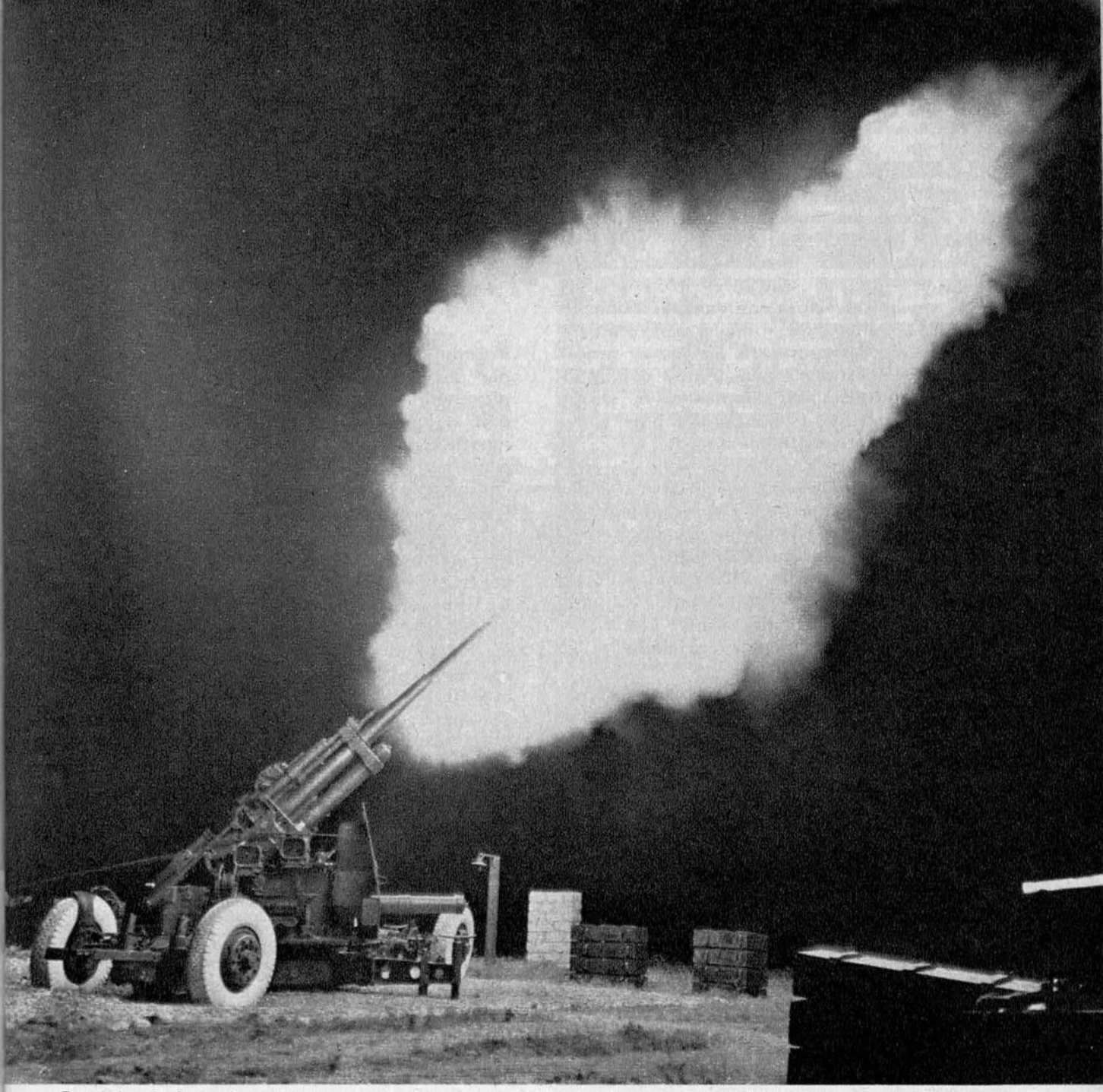
Le bilan radiatif total tenant compte du flux solaire absorbé au sol se traduit, à cette même échelle de 24 heures, par des énergies assez variables, pouvant même être négatives dans les régions polaires en hiver mais le plus souvent positives et atteignant 2 500 kJ par mètre carré, par exemple, en région équatoriale ou à nos latitudes en été.

Il suffit de chiffrer en comparaison les possibilités humaines actuelles pour constater que toute action de force sur le temps ne peut guère être envisagée :

— un radiateur électrique de 2 kW, suffisant en hiver pour une pièce de 15 mètres carrés, ne fournit en 24 heures de marche continue que ce que le faible soleil d'hiver a pu apporter à 50 mètres carrés de sol durant les quelques heures de jour, ou qu'il apporte à 10 mètres carrés par une journée d'été (2×10^8 J) ;

— la plus puissante centrale électrique existant aujourd'hui, de 600 MW, produit en 24 heures l'énergie que l'atmosphère reçoit de quelques kilomètres carrés de sol, pour la même durée, et dans le cas d'une journée moyenne à nos latitudes (5×10^{13} J) ;

— une bombe H de plusieurs mégatonnes ne dissipe en un instant, dans un rayon de quelques dizaines de kilomètres, qu'une énergie très voisine de celle que reçoit du soleil, en moyenne, la même surface de sol durant une journée (10^{17} J).



Agence TASS

Empêcher la formation des nuages de grêle, une action modeste, mais d'un intérêt certain pour l'agriculture..

Si l'on envisage maintenant les dimensions, les volumes ou les masses des systèmes nuageux, on ne peut qu'être encore plus écrasé par les énergies mises en jeu :

— un simple cumulus représente, sous forme de gouttelettes, plusieurs milliers de tonnes d'eau liquide élevées à plusieurs kilomètres de hauteur et qui ont exigé près de dix mille milliards de joules pour leur évaporation ;

— une faible pluie de 1 mm correspond à 10 mètres cubes d'eau par hectare, ou à 1 000 tonnes d'eau par kilomètre carré. Cette masse d'eau, pourtant, peut être évaporée par le soleil en moins d'une heure ;

— l'énergie interne d'un système cyclonique est de l'ordre de plusieurs millions de mégatonnes, si on la compare à une bombe thermonucléaire. Ces quelques remarques nous montrent clairement l'inanité de toute action brutale de l'homme, toujours disproportionnée et ridicule vis-à-vis des énergies naturelles.

Le temps « normal » et ses variations

Afin d'envisager les possibilités d'action de l'homme quant à la modification du temps, il convient d'essayer d'abord de définir le temps « normal ».

Le climat, dans son ensemble, se caractérise statistiquement par les valeurs moyennes (normales) des paramètres habituels. Les variations séculaires sont lentes et faibles et une extrapolation reste toujours valable sous réserve d'écarts de courte durée statistiquement probables et possibles.

A plus faible échelle, la notion de temps météorologique normal ne peut guère être approchée qu'en prenant en considération l'altération des phénomènes physiques qui nous sont connus et qui paraissent les gouverner. Disons, en simplifiant, que l'on suppose que, toutes conditions restant identiques par ailleurs (relief, échanges d'énergie, etc.), l'évolution du phénomène se fait de manière continue.

Ces remarques étant faites, on peut alors définir les « modifications provoquées » comme des écarts anormaux entre les conditions effectivement réalisées et celles qui auraient pu être prévues, physiquement et statistiquement, pour le même lieu et le même moment. C'est ainsi seulement qu'il devient possible de juger objectivement les modifications éventuellement apportées par l'homme au climat et au temps.

De nombreuses difficultés peuvent se présenter, en particulier dans les régions au relief accidenté, difficultés qui exigent pour être surmontées une étude poussée des phénomènes et de leur évolution « normale » en chaque point et dans chacune des diverses situations synoptiques envisagées. Il faut aussi signaler les perturbations apportées aux échanges énergétiques par l'existence de discontinuités à la surface du sol : la rugosité superficielle, la capacité thermique du sol, les bilans radiatifs, l'évapotranspiration végétale (types et stades de végétation, alimentation en eau), et l'évaporation des nappes d'eau libres sont autant de facteurs dont l'influence est sensible sur le temps local, sinon sur le climat.

La conjugaison de tous ces aspects à l'échelle d'une ville oblige souvent à considérer de véritables « climats urbains » particuliers, généralement limités à la ville elle-même et donc de peu d'importance synoptique.

A grande échelle, ce sont surtout les discontinuités correspondant aux côtes qui peuvent apparaître importantes à l'échelle du climat, sans négliger cependant l'influence des vastes régions de forêts, exerçant des effets assez voisins de ceux d'un océan ou d'un lac.

Ainsi le temps et le climat peuvent être naturellement et normalement différenciés en deux points voisins par les influences de l'orographie et de la géographie de surface. Nous ne considérerons pas ces variations comme des perturbations ni comme des modifications humaines volontaires, mais seulement comme des accidents, plus ou moins bien connus, pouvant découler des activités de l'homme. Nous examinerons, dans les pages qui suivent, les actions humainement possibles pour modifier, dans un sens défini, l'évolution normale des phénomènes météorologiques.

Modifier les climats, tentative titanesque

Puisque le climat est conditionné avant tout par des transports d'énergie au sein de l'atmosphère et entre le sol et l'atmosphère, on doit logiquement envisager des possibilités de modifications par l'intermédiaire d'actions dirigées vers les sources d'énergie et les bilans énergétiques à grande échelle.

Source principale d'énergie, le rayonnement solaire incident ne peut guère être modifié par des actions humaines directes. On peut alors envisager d'agir sur l'atmosphère pour accroître son facteur de réflexion, par exemple en intervenant systématiquement sur la quantité et le type de nuages. Mais les masses et les énergies en jeu interdisent pratiquement une action directe dans cette voie, bien que la création d'un nuage artificiel de particules réflectrices, satellisées sous forme d'une bande de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres de large à quelques centaines de kilomètres d'altitude, ne soit pas inimaginable. Une telle ceinture, réduisant de 10 à 20 % le rayonnement solaire parvenant dans les régions intertropicales, devrait modifier très sensiblement les transferts méridiens d'énergie et la répartition des climats. Mais les répercussions n'en ont pas encore pu être appréciées, et les incertitudes relatives au bilan économique d'une telle opération interdisent encore de l'envisager sérieusement.

Il reste une dernière possibilité consistant à intervenir non sur le rayonnement solaire incident, mais plutôt sur son absorption à la surface du sol. On a ainsi proposé de « peindre » les calottes polaires en noir à l'aide d'une mince couche de suie ou de poussière de charbon, en vue de provoquer un accroissement de l'énergie absorbée et, par voie de conséquence, leur lente fusion. Mais, en plus des incertitudes qui planent quant à l'évolution consécutive des courants océaniques et même quant à une modification éventuelle de l'axe de rotation terrestre, ce projet nécessiterait une mobilisation totale des transports aériens pendant une durée appréciable : une couche de 1 micron d'épaisseur impliquerait, pour le seul Groenland, le « saupoudrage » de plusieurs millions de tonnes de suie... Cette couche serait d'ailleurs disloquée et partiellement éliminée dès le début de la fusion.

Des actions à grande échelle dans le domaine du rayonnement solaire, même si elles deviennent réalisables, resteront extrêmement coûteuses. Pour les envisager raisonnablement, il serait d'ailleurs indispensable d'en prévoir toutes les incidences climatiques et économiques, ce que l'état actuel de nos connaissances ne permet pas. De telles perspectives ne peuvent toutefois être écartées pour le XXI[e] ou le XXII[e] siècle.

Le rayonnement terrestre

Le rayonnement propre de l'atmosphère est principalement lié à sa teneur en vapeur d'eau et gaz carbonique et aux nuages présents. Nous savons ce qu'il en est de la création artificielle de nuages et nous examinerons plus loin, à plus petite échelle, leur suppression éventuelle. Cette éventualité étant écartée, on peut chercher à modifier le contenu de l'atmosphère en eau ou en gaz carbonique.

A grande échelle, c'est surtout la végétation qui dicte les équilibres dans ce domaine, les interventions humaines directes restant le plus souvent négligeables, bien que l'on attribue parfois au développement industriel une très légère augmentation du taux de gaz carbonique, tenue pour responsable d'un très lent et discutable accroissement séculaire de la température au sol.

Les actions humaines sont mal contrôlables et ne peuvent atteindre les ordres de grandeur utiles qu'en portant sur d'immenses étendues de végétation ou de surfaces d'eau. La désertification ou, au contraire, le reboisement, intervenant aussi bien sur l'évapotranspiration que sur les transformations de l'énergie solaire, peuvent ainsi modifier, lentement mais sûrement, le climat d'une région. Il en est de même de la création ou de l'assèchement de vastes mers ou de lacs intérieurs.

Le bilan au sol du rayonnement terrestre est lié à la température et à l'état de la surface du sol. Des modifications de surface peuvent intervenir sur l'émissivité propre du sol, mais semblent le plus souvent illusoires quant à leur application systématique. Envisager de recouvrir le sol d'immenses surfaces métallisées, réflectrices des rayonnements solaire et terrestre, ou de films plastiques noirs, par exemple, ne paraît guère utilisable qu'à petite échelle, sans conséquence sur le macroclimat. Il en est presque de même pour les températures de surface, en étroite concordance avec la conductivité thermique du sol, mais restant cependant soumises aux phénomènes annexes d'évaporation-condensation qui transportent de grandes quantités d'énergie.

L'évaporation provoquée : des effets ambigus

La création de vastes surfaces liquides évaporantes, de budget thermique par ailleurs fort différent de celui d'un sol, peut, aussi bien que leur suppression ou leur modification, déterminer des déséquilibres notables des bilans thermiques et, par suite, des modifications aux climats de larges zones avoisinantes.

On a pu ainsi proposer la mise en communication de vastes dépressions existant à l'intérieur des terres, par exemple à la frontière algéro-tunisienne ou en Egypte, avec la Méditerranée, pour créer des mers intérieures, génératrices d'évaporations et de nuages et entraînant la formation de pluie sur les contrées semi-désertiques du voisinage. Accessoirement, une certaine énergie hydromotrice serait disponible et des salines naturellement engendrées. De même, une irrigation à très grande échelle a été envisagée par l'édification d'énormes barrages coupant le cours de fleuves en vue de remplir d'immenses cuvettes naturelles, par exemple au sud du Tchad.

De graves doutes planent sur l'évolution ultérieure et sur l'échelle des conséquences de tels aménagements. De nombreux mécanismes autorégulateurs existent en effet pour atténuer les effets possibles : la création de nuages, par exemple, diminue l'apport d'énergie solaire et donc l'évaporation.

A plus faible échelle, on a pensé à exploiter rationnellement les « marées noires » ou à installer de grands films plastiques noirs juste sous la surface de la mer pour augmenter sa température et accroître l'évaporation. Le détournement de courants océaniques, chauds ou froids, a aussi été proposé, de même que le remplacement des eaux froides de l'océan Arctique par des eaux plus chaudes prélevées dans le Gulf-Stream. Dans tous ces cas, et c'est une loi naturelle, les phénomènes d'évaporation ne peuvent être dissociés des aspects thermiques qui les accompagnent, et la complexité des réactions thermodynamiques de l'atmosphère rend délicate toute tentative de prévision d'évolution et douteux tout essai d'appréciation de rentabilité économique, au moins aujourd'hui.

Rappelons enfin les procédés cherchant à réduire et même à annuler l'évaporation naturelle. Les films de matière plastique noire peuvent jouer un rôle thermique certain, mais leur étanchéité à l'eau permet d'interdire aussi tout échange de vapeur entre le sol et l'atmosphère. De même, la mise en place d'une pellicule monomoléculaire bien choisie sur de vastes surfaces d'eau libre peut modifier considérablement le déroulement des phénomènes météorologiques. Cette idée est actuellement

appliquée, d'une part, aux réservoirs des usines hydroélectriques en vue d'éviter des pertes importantes par évaporation, mais aussi, à la lutte contre les cyclones pour tenter de limiter leur développement, intimement lié à l'énergie qui leur est transférée par évaporation depuis l'océan.

Les barrières géographiques

Lorsque les possibilités d'action sur l'apport énergétique solaire ou sur le bilan radiatif au sol sont écartées et que des modifications éventuelles aux mécanismes d'évaporation ne peuvent être envisagées, on peut penser à agir sur le relief terrestre.

Cette méthode a déjà été abordée à propos des lacs intérieurs, mais elle peut être étendue au détournement de courants naturels, qu'il s'agisse de courants océaniques ou de courants atmosphériques. Si la création de barrières géographiques importantes reste difficile, la suppression de certaines parties de chaînes montagneuses pourra bientôt être possible grâce à des explosions nucléaires.

On peut alors imaginer la création de nouveaux courants en altitude, changeant très sensiblement la répartition des régimes de nébulosité et de pluie dont certaines discontinuités apparaissent sous la dépendance étroite et exclusive de chaînes montagneuses continues.

Mais une telle méthode apparaît, en général, d'application difficile, et, dans le cadre des climats associés à la vie humaine active, pour

USIS

Faire pleuvoir à volonté,
une entreprise séduisante qui a suscité
de nombreux travaux depuis plusieurs
dizaines d'années.
Selon les circonstances,
plusieurs méthodes sont utilisables,
avec des succès irréguliers.
L'ensemencement de nuages par de fins cristaux
d'iodure d'argent, parfois largués d'un avion,
a donné des résultats.

un avenir de l'ordre du siècle, il semble que des modifications sensibles de climat ne peuvent guère être proposées efficacement qu'en agissant indirectement, par l'intermédiaire de perturbations provoquées au cycle naturel de l'eau ou à sa répartition géographique.

Modifier le temps : Une entreprise moins ambitieuse

Nous considérons ici le temps au sens météorologique du mot, caractérisant les phénomènes atmosphériques dans un intervalle de temps relativement faible, à l'inverse du climat qui considère le temps statistiquement, sur de longues durées. Cette distinction peut sembler arbitraire : elle est cependant justifiée par l'échelle d'espace généralement associée au temps, qui implique l'étude des phénomènes localisés souvent ignorés par le climat, et par les ordres de grandeur très nettement différents quant aux énergies à mettre en jeu pour peser éventuellement sur l'évolution des paramètres météorologiques aux deux échelles considérées.

Nous envisagerons successivement quelques manifestations d'origine météorologique que l'homme a tenté ou essayé de modifier à son avantage.

En ce qui concerne la pluie, par exemple, nos connaissances sur son origine nous permettent de penser que les gouttes sont formées soit par la réunion de nombreuses microgouttelettes, par coalescence, soit pas accroissement rapide du volume d'une gouttelette (elle-même formée à partir de noyaux de condensation hygroscopiques), soit par la fusion de flocons ou de cristaux ayant pris naissance sur des noyaux de congélation.

Les processus de diffusion de la vapeur d'eau, transférant l'eau liquide des gouttelettes surfondues vers les cristaux de glace, agit de manière particulièrement efficace entre — 2 et — 6° et uniquement dans le cas où il existe une telle surfusion. Par contre, si deux phases seulement sont en présence, la phase vapeur et la phase solide ou liquide, les vitesses de diffusion sont plus faibles, réduisant les vitesses d'accroissement (même s'il existe un assez grand nombre de gros noyaux hygroscopiques) et la coalescence demeure nécessaire pour assurer la formation des gouttes de pluie.

Comment faire tomber la pluie

Dans tous les cas, la possibilité de créer la pluie est d'abord soumise à l'existence de gouttelettes, donc de nuages, et la formation de ces nuages dépend directement de l'humidité de l'air et de sa température, ou plutôt de ses variations de température (refroidissement dû à la détente adiatique par convection thermique ou forcée, par exemple), et aussi de la présence de noyaux de condensation ou de congélation.

La préexistence des nuages est donc nécessaire. Certains projets ont ainsi cherché à les provoquer en imaginant, par exemple, de créer un vaste lac artificiel entouré de larges plages de sol noirci : l'échauffement localisé provoquerait des ascendances thermoconvectives alimentées par l'air humidifié au contact des eaux superficielles, et la formation des nuages devrait s'ensuivre.

Le parallélisme avec les mécanismes naturels est évident, en particulier pour le développement des cumulus, mais certains perfectionnements consistent à accélérer la convection par le tirage naturel d'une immense cheminée de fort diamètre et de quelques centaines de mètres de hauteur, par exemple forée au sein d'une colline, et à échauffer l'air aspiré par effet de serre à l'aide d'insolateurs servant également d'humidificateurs. Ces propositions restent à la limite d'une coûteuse fantaisie et nous n'envisagerons que l'hypothèse où des nuages naturels sont présents.

Pour provoquer ou hâter le grossissement des gouttelettes existantes, on peut alors envisager plusieurs méthodes.

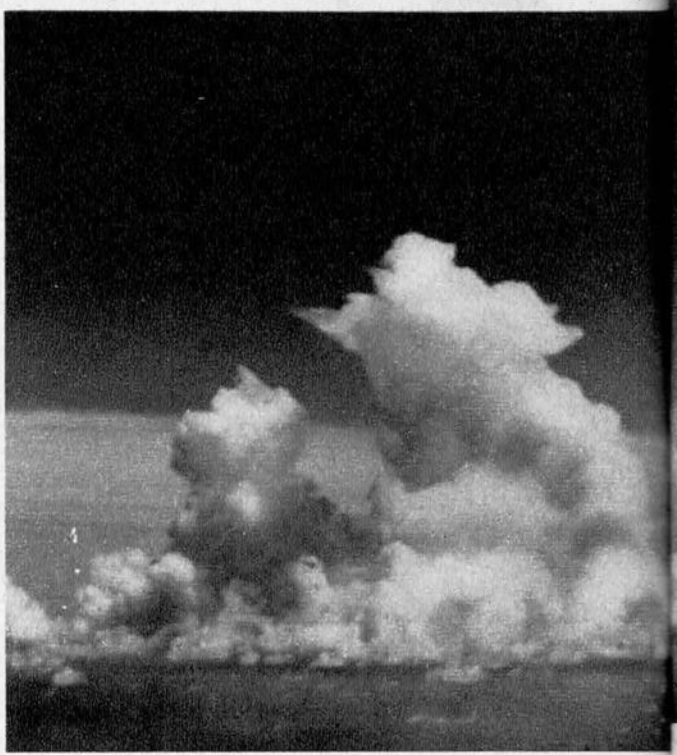
Si le nuage est entièrement *à des températures supérieures à 0°*, on peut introduire des noyaux de condensation hygroscopiques géants, destinés à servir de germes cristallins actifs pour provoquer la formation des gouttes de pluie. On a pu aussi réaliser certains déclenchements de pluie artificielle en arrosant simplement le nuage avec de l'eau pulvérisée, c'est-à-dire en intervenant directement au stade de la coalescence.

Bien entendu, il faut que le nuage attaqué soit déjà dense, bien chargé en eau, et le procédé aura d'autant plus d'efficacité que la turbulence interne du nuage sera plus faible. C'est ainsi que les nuages stratiformes réagissent parfois fort bien à de telles interventions, en se dissipant rapidement tout au long de la bande arrosée ou traitée, mais la pluie recueillie reste toujours faible, et n'atteint pas toujours le sol sans être évaporée.

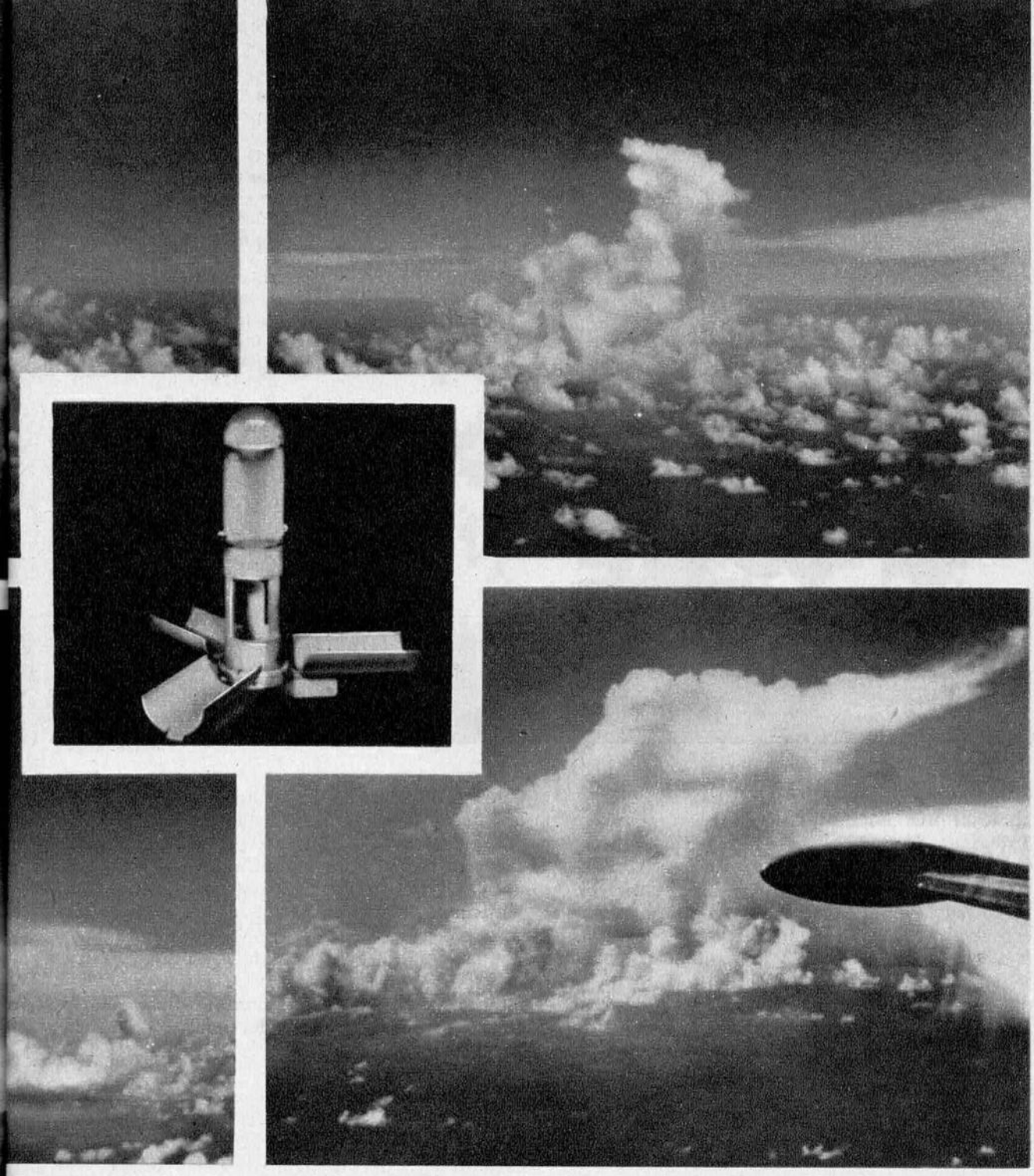
Dans certains cas, en régions équatoriales par exemple et lorsque les noyaux naturels sont rares, la méthode est efficace sur des nuages cumuliformes. La condensation sur les noyaux hygroscopiques provoque par ailleurs un léger échauffement, de l'ordre de 1 à 2 °C, qui favorise la thermoconvection et la turbulence, et ainsi à la fois la condensation et la coalescence. On utilise dans ce cas du sel marin micronisé ou du chlorure de calcium anhydre.

Si une partie du nuage est *à température négative* et s'il existe *des gouttelettes surfondues*, on peut introduire des noyaux de congélation destinés à amorcer la formation des cristaux, ou chercher à déclencher la cessation de la surfusion en provoquant leur cristallisation instantanée brutale par des moyens mécaniques ou physicochimiques.

Le refroidissement provoqué par la détente de propane ou l'ensemencement à l'aide de « neige carbonique » est utilisé avec succès sur les nuages stratiformes, peu alimentés en eau, qui peuvent se dissiper en ne donnant que de faibles précipitations neigeuses. C'est là une technique de dissipation des brouillards que nous examinerons plus loin.



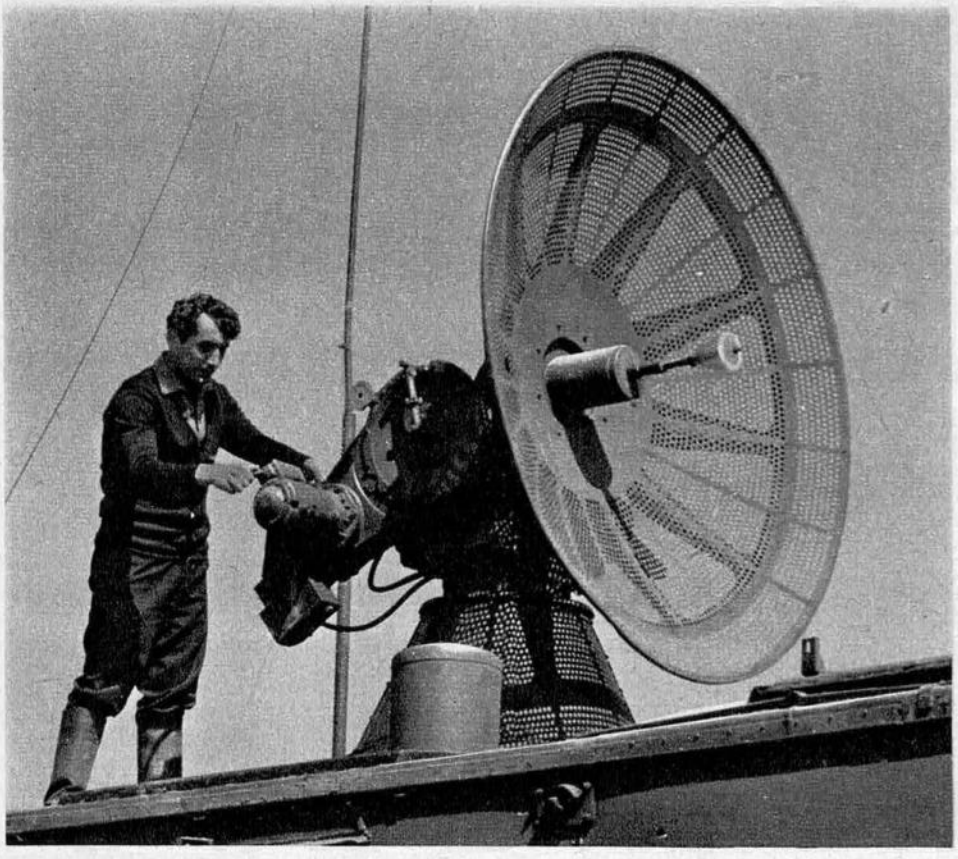
Quatre étapes de l'explosion d'un cumulus tropical ense-



mencé à l'iodure d'argent au moyen de 25 conteneurs comme celui représenté au centre et largués d'un avion.

Pour les nuages cumuliformes, en particulier, l'insémination en noyaux de congélation reste la méthode habituelle, sous réserve de choisir des noyaux particulièrement actifs et efficaces, accélérant les évolutions naturelles. De tels noyaux doivent posséder une structure cristallisée similaire à celle de la glace : l'iodure d'argent, le phloroglucinol, la silice active cristallisée et l'urée sont autant de corps possédant un bon pouvoir de nucléation. Leur dispersion au sein du nuage est effectuée soit par combustion d'une mèche, soit par explosion d'une charge, soit à l'aide de brûleurs placés au sol.

Les résultats obtenus sont très variables, et de vastes campagnes d'ensemencement systématique ont été entreprises pour tester l'efficacité de la méthode et ses limites. Le temps de réaction du nuage reste difficilement prévisible, de dix à trente minutes en général, et



Le programme en cours en Arménie Soviétique pour la protection des cultures, évoqué par ailleurs en page 57 de ce numéro, utilise un système de radars pour la détection et l'identification des nuages générateurs de grêle.
Le tir d'obus à réactifs chimiques (photo p. 147) multiplie les centres de cristallisation et empêche la croissance de grêlons.

Dans le cadre de ce même programme, les équipes de recherche disposent d'importants moyens de liaison et en particulier d'hélicoptères pour aller rapidement contrôler les effets sur les cultures.

le choix du nuage et de son stade d'évolution apparaît très important, le sommet du nuage atteignant de préférence — 5 à — 8 °C.
On a pu relever une augmentation localisée des pluies de l'ordre de 15 à 30 % dans certains cas favorables de masses d'air maritime contenant peu de noyaux. On prévoit alors une diminution probable des pluies dans les régions en aval de la zone d'efficacité. Mais de nombreux essais se sont aussi soldés par des échecs totaux, probablement par suite de l'existence de noyaux naturels en quantité suffisante et de conditions locales inadéquates.

Lutter contre la grêle

La formation de la grêle nécessite de forts courants ascendants capables de soutenir les germes dans les régions du nuage à température négative, en leur permettant d'accroître leur diamètre surtout par captation mécanique de gouttelettes surfondues.
La lutte contre la grêle doit donc tenter, soit de diminuer la vitesse des courants ascendants, ce qui paraît difficile compte tenu de l'énergie qu'ils mettent en jeu, soit d'empêcher le grossissement des gouttelettes surfondues, puis des grêlons, en créant, par exemple, un grand nombre de centres actifs et en hâtant la cristallisation. Le problème est alors très voisin de celui qui vient d'être évoqué pour la pluie artificielle. Les mêmes substances peuvent être employées avec succès, en particulier l'iodure d'argent, sous réserve d'attaquer le nuage à un stade d'évolution peu avancé et d'effectuer l'injection des noyaux à un niveau convenable (fonction de la masse d'air où se forme le nuage d'orage et de l'évolution de celui-ci). Les fusées, comme les obus, servent souvent de véhicules porteurs, et l'explosion même de la charge semble pouvoir aider l'action antigrêle par des mécanismes encore mal élucidés, liés à l'onde de choc.
Mais la connaissance des divers paramètres utiles reste encore imprécise et les résultats obtenus très disparates, spectaculaires dans certains cas, décourageants dans d'autres. En Argentine, par exemple, des ensemencements réguliers ont permis de réduire très sensiblement les chutes de grêle provenant de fronts froids organisés, alors que des cumulonimbus isolés voyaient leur activité renforcée. Les résultats statistiques de ces interventions se présentent comme très difficiles à analyser et délicats à interpréter.
Les essais actuels ne peuvent encore parvenir à la définition d'actions antigrêle efficaces et sûres. La masse d'air où se forme l'orage, caractérisée par la structure verticale de l'atmosphère, par son contenu en noyaux, le déplacement et l'évolution du nuage, son état dyna-

Agence TASS

mique, tout cela devrait être connu avec une meilleure précision. Les aspects électriques devraient aussi probablement être pris en considération pour être éventuellement utilisés.

La dissipation des brouillards

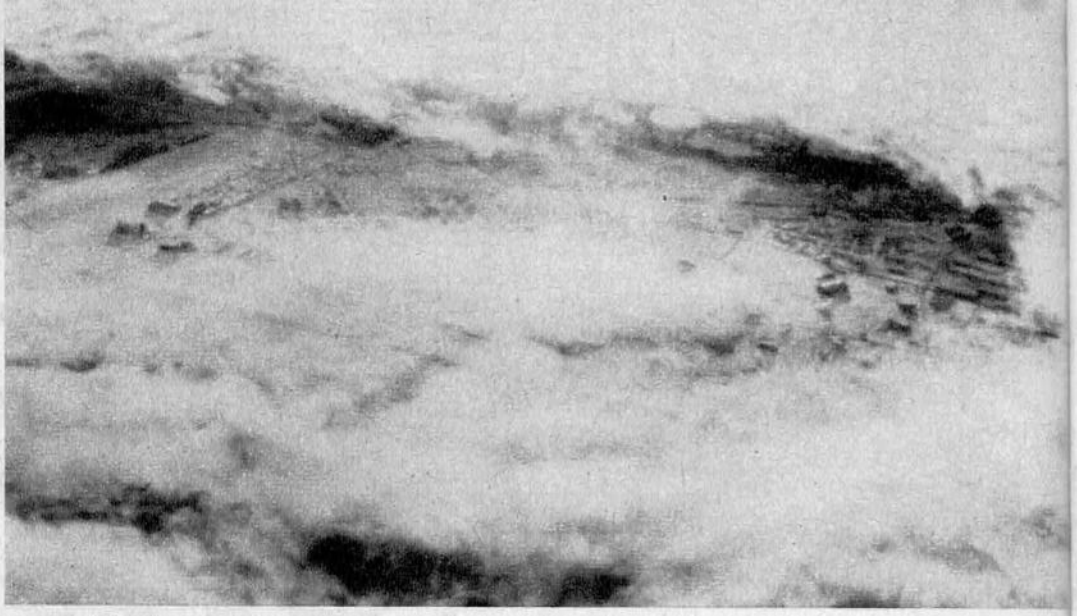
Il s'agit là d'un problème important pour la sécurité aérienne, mais aussi pour d'autres applications. Le brouillard n'étant qu'un nuage au sol, toutes les méthodes de dissipation des nuages peuvent être envisagées, mais plus particulièrement celles qui s'appliquent aux nuages stratiformes. Par température négative, l'emploi de propane ou de neige carbonique s'avère généralement efficace. L'utilisation de micronoyaux de congélation pourraît être prévue dans certains cas, bien que leur présence naturelle en quantité suffisante soit le plus souvent acquise au voisinage du sol.

Pour la « dénébulation » d'une piste d'aérodrome, d'autres méthodes ont vu le jour, applicables en particulier lorsque le vent est pratiquement nul. Il s'agit, par exemple, de réchauffer l'atmosphère au voisinage de la piste de manière à provoquer l'évaporation des gouttelettes. Les énergies à mettre en jeu sont très importantes et le rendement souvent mauvais, malgré les perfectionnements apportés au système FIDO de la dernière guerre par l'emploi de turboréacteurs d'avion, peu coûteux, éjectant les gaz brûlés par des tuyères spéciales. Des études aérodynamiques destinées à optimiser le mélange et la localisation du jet d'air chaud ont permis d'étendre quelque peu les possibilités d'application de cette méthode, qui reste cependant peu généralisable et toujours coûteuse. Elle apporte par ailleurs un supplément de vapeur d'eau et de noyaux parfois gênant.

On a aussi envisagé un principe tout différent. On fait appel à des générateurs de « bulles de savon » gonflées à l'hydrogène. Captant les gouttelettes et s'alourdissant lors de leur ascension, ces bulles redescendent jusqu'au moment où une goutte d'eau s'en détache et recommencent leur va-et-vient vertical en nettoyant peu à peu la zone traitée.

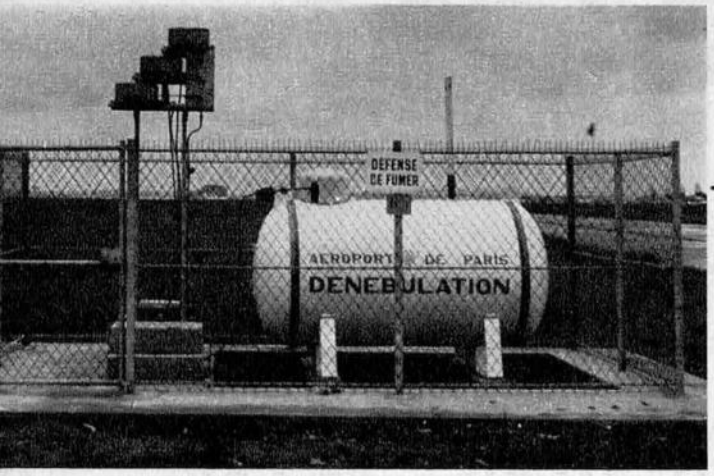
Malgré des possibilités d'action efficaces sur les brouillards à températures inférieures à 0 °C, aucune méthode sûre n'est donc encore utilisable pour la dissipation des brouillards « chauds ». Les moyens envisagés présentent souvent des inconvénients réels pour l'aéronautique (turbulences induites par l'éjection de gaz chauds, savonnage de la piste par les bulles éclatées) et restent inutilisables dès que le moindre vent renouvelle le brouillard à traiter.

Pour les brouillards de rayonnement denses mais en couche de faible épaisseur et surmon-



Dans certains cas, les brouillards denses peuvent être traités par les méthodes d'ensemencement classiques. On voit ici l'application de la méthode, par avion, au-dessus d'une base américaine en Alaska.

USIS



Des méthodes particulières sont utilisées au niveau des pistes. L'Aéroport de Paris a mis au point la technique au propane. Elle n'est cependant pas utilisable pour les brouillards chauds, au-dessus de 0°.

tés d'air relativement chaud et sec, il existe une autre méthode consistant à brasser l'air au voisinage du sol à l'aide de vastes hélices (en particulier avec des hélicoptères en vol quasi stationnaire). Le réchauffement obtenu par mélange vertical peut, dans certains cas, permettre l'évaporation des microgouttelettes et les turbulences induites facilitent la coalescence. Plus économique que les précédentes, cette méthode ne peut être systématiquement employée. Elle apparaît cependant efficace pour des nuages stratiformes se formant sous une inversion de température à des hauteurs de quelques centaines de mètres.

Maîtriser les cyclones

Si le brouillard n'est qu'un cas particulier et localisé des nuages stratiformes, le cyclone correspond au contraire à une extension des mouvements convectifs créant normalement les nuages cumuliformes. Là aussi, les méthodes évoquées à ce propos peuvent être extrapolées. Comme pour la lutte antigrêle, on peut prévoir des ensemencements massifs à l'aide de noyaux d'iodure d'argent, obligeant le cyclone à s'étendre et réduisant son activité centrale. Mais on ne doit pas exclure l'utilisation de moyens à grande échelle, du type de ceux envisagés pour la modification des climats : réduction de l'évaporation marine à l'aide de produits en couche moléculaire sur de vastes étendues, peut-être réduction du rayonnement solaire incident par création de nuages artificiels. Les résultats de telles interventions restent encore difficilement prévisibles et les efforts actuels s'orientent, d'une part, vers une estimation numérique de ces effets, d'autre part, vers les moyens de détection des cyclones à l'état naissant. On peut ainsi espérer réduire les énergies à déployer pour annuler leur développement.

Les gelées nocturnes

Les refroidissements nocturnes de printemps, souvent néfastes à l'arboriculture et à l'horticulture, se produisent normalement par nuit calme et claire, lorsque l'atmosphère reste pure et relativement sèche. Le bilan radiatif au sol est alors, toute la nuit, fortement négatif et les abaissements de température peuvent atteindre des valeurs critiques pour des végétaux encore fragiles.

Plusieurs moyens sont employés, qui font appel à des méthodes différentes. On peut d'abord essayer de réduire la valeur absolue du bilan radiatif. Il suffit pour cela d'étendre sur la zone à protéger un vaste voile, imperméable au rayonnement terrestre. Si les serres exploitent depuis longtemps ce principe à l'aide de simples plaques de verre, les plantations de

plusieurs hectares nécessitent la création artificielle de nuages bas, suffisamment denses et chargés en eau, produits à l'aide de brûleurs. On peut également utiliser l'effet tampon dû à la condensation de la vapeur d'eau en humidifiant l'air dès le début de la nuit. On utilise même la chaleur latente de congélation de l'eau, sous réserve que le seuil de 0 °C ne soit pas critique. On peut aussi réchauffer l'air (c'est l'un des rôles annexes, non négligeable, des brûleurs évoqués précédemment), par apport de calories ou par création de turbulences au sein de la couche d'air froid au sol. Si le sol est très sec, on peut, par des arrosages importants, faciliter le transfert à l'atmosphère des réserves thermiques contenues dans le sol, augmentant la conductivité thermique du sol et permettant accessoirement l'humidification de l'air. Dans le cas général de fortes inversions de température, l'emploi de grands ventilateurs ou d'hélicoptères brassant l'air pour réchauffer par mélange les couches près du sol est aussi préconisé.

Selon les cas envisagés, toutes ces méthodes peuvent être associées pour assumer des moyens de défense souvent efficaces, mais toujours coûteux. Leur rentabilité reste essentiellement assujettie à une mise en œuvre à bon escient, tenant compte de prévisions de gelées parfaitement adaptées à chaque plantation.

Des interventions pas toujours heureuses

A côté de ces exemples d'interventions dirigées et volontaires, il convient de faire une place aux incidences involontaires de l'activité humaine.

L'industrialisation croissante, le déboisement ou les explosions nucléaires sont parfois considérés comme des causes de changement du temps et du climat. Les chiffres cités au début de cet article quant aux énergies nécessaires montrent pourtant que les plus imposantes ressources énergétiques humaines ne peuvent guère être comparées à celles du rayonnement solaire. Leur influence directe sur le climat d'une région ne peut qu'être négligeable.

Par contre, à l'échelle d'une ville, les perturbations apportées à l'alimentation du sol en eau et aux phénomènes naturels d'évaporation, peuvent, au même titre que la pollution engendrée par le dégagement de fumées, de gaz carbonique ou de poussières, ou la modification de l'orographie et de la rugosité, justifier la notion, généralement péjorative, de « climat urbain ».

Le temps peut aussi être localement perturbé par des changements notables de la couverture végétale qui assure une certaine régulation énergétique et chimique naturelle. L'évapotranspiration végétale, la photosynthèse, les échanges radiatifs qui en découlent interviennent souvent de manière sensible sur l'équilibre final de l'atmosphère au voisinage immédiat. L'importance des forêts doit être soulignée ici.

Les activités aéronautiques et spatiales, qui se traduisent par une certaine pollution artificielle de la stratosphère, ne semblent pas pouvoir exercer d'influence sensible sur les équilibres thermiques et chimiques en altitude, même par voie indirecte. Il existe en effet trop de différence entre les masses ou les volumes naturels et les injections artificiellement produites. Cependant, l'action spécifique de certains corps particuliers, comme le lithium, devrait être étudiée avec soin, et les phénomènes électriques de la haute atmosphère mieux connus pour pouvoir porter un jugement définitif.

Développer nos connaissances

Si les modifications provoquées du climat restent encore du domaine de l'imagination, l'action de l'homme sur le temps s'avère, dans certains cas, possible. Il ne peut alors s'agir d'interventions brutales, mais plutôt de l'exploitation intelligente de phénomènes naturels dont on essaie de détourner l'évolution normale. Pour ce faire, il apparaît que nos connaissances des causes et des effets en matière de météorologie sont insuffisantes. De nombreuses recherches restent encore nécessaires, tant sur le plan de la physique pure, à diverses échelles de temps et d'espace, que dans les domaines annexes du traitement de l'information, de l'aérodynamique, de l'électricité atmosphérique, de la biométéorologie, etc.

Afin d'éviter de jouer à l'apprenti-sorcier, l'homme doit pouvoir d'abord connaître ses possibilités et les conséquences les plus probables, directes et indirectes, de ses actes. Alors seulement pourra-t-il juger de l'opportunité, de la rentabilité ou de l'efficacité de ses interventions. Cette philosophie n'est d'ailleurs pas propre à la météorologie et elle n'exclut nullement le développement d'une science dont les applications, et les implications humaines, s'étendent chaque jour.

Si les promesses techniques font envisager la création future d'immenses serres, conditionnées artificiellement, pour l'« élevage » confortable de l'homme sur notre Terre ou sur la Lune, médecins, psychologues, sociologues, architectes même, chercheront probablement à y créer des conditions de vie « naturelles » qu'il nous faut donc, encore une fois, mieux connaître.

Christian PERRIN de BRICHAMBAUT

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

24, Rue Chauchat, Paris 9e - Tél. 824 72 86
C.C.P. 4192-26 Paris

LES MEILLEURS LIVRES 1969-1970

ASTRONOMIE

A L'AFFUT DES ÉTOILES. Manuel pratique de l'astronome amateur. Bourge P. et Lacroux J. — Les débutants comme les amateurs chevronnés y trouveront des conseils pour leurs observations, des méthodes pour photographier la Lune et le Soleil et des schémas de montages simplifiés permettant de construire soi-même des accessoires indispensables à l'observation visuelle ou photographique. 312 p. 15 × 22, 170 fig., 1969 ..... **F 24,00**

L'ASTRONOMIE EXPÉRIMENTALE. Pecker J.-C. — L'astronomie serait-elle une science expérimentale ? Les satellites, astres artificiels, ou l'« introduction à la mécanique céleste expérimentale ». Invitation à l'astronautique. Et l'astrophysique expérimentale ? L'exploration directe du monde extra-terrestre. La pluralité des mondes habités. Après dix ans de recherches spatiales. Appendice : Constantes physiques universelles. Le soleil. Le système solaire. 156 p. 13,5 × 18, 35 fig., 4 planches, photos hors-texte, 1969..... **F 20,00**

STRUCTURE DE L'UNIVERS. Schatzman E. — Depuis ces dernières années, les astronomes ont identifié des objets étranges, super-lumineux, connus sous le nom de « quasars » si lointains que la lumière que nous en recevons maintenant avait commencé son long voyage avant que la Terre n'existe. Que sait-on vraiment de l'histoire des galaxies et de la structure de l'univers ? L'espace est-il fini ou infini ? Ce sont ces questions et beaucoup d'autres que discute le professeur Schatzman à la lumière des plus récentes découvertes de l'astronomie et de l'astrophysique. — Introduction et historique. La galaxie. Le temps. L'espace et les galaxies. L'univers. 256 p. 12,5 × 19, 30 fig. et cartes, 40 photos dont 16 en couleurs, 22 tabl., 1969 ..... **F 15,00**

LA LUNE ET LES PLANÈTES. P. de Latil et Ceuzin P. — Avant-propos historique. La Lune et les planètes. L'architecture de l'univers. Le Soleil, notre étoile. Les planètes brûlantes : Mercure et Vénus. Mars et les petites planètes. Les planètes géantes. La Lune, notre banlieue. 190 p. 21 × 28, 126 figures et photos en noir et 74 en couleurs, cart., 1969 ..... **F 25,00**

LES OBSERVATOIRES SPATIAUX. Pecker J.-C. — Les raisons d'être de l'astronomie spatiale: La structure des couches atmosphériques. Le mur opaque de l'atmosphère. La diffusion de l'air : extinction atmosphérique et bleu du ciel. L'inhomogénéité de l'atmosphère terrestre; nuages et réfractions. Le barrage aux particules. La fusion des météorites. Inventaire provisoire et partiel de quelques-unes des connaissances que l'on pourrait acquérir par les moyens spatiaux : la diffusion est abolie. La turbulence est supprimée. L'opacité dans l'ultra-violet est éliminée. L'astronomie aux courtes longueurs d'onde. L'opacité infrarouge est écartée : vers l'infrarouge avec les ballons. L'ionosphère est traversée : vers les très grandes longueurs d'onde avec les satellites très excentriques. Conclusion prospective limitée. Conclusion. Appendice : Constantes physiques universelles. Le Soleil. Le système solaire. 180 p. 13,5 × 18, 48 fig., 12 tabl., 7 planches photos hors-texte, 1969 ..... **F 25,00**

INFORMATIQUE

COMPRENDRE L'INFORMATIQUE. (Coll. « Ce qu'il vous faut savoir »). Pilorge R. — Notions d'informatique: Historique et évolution. Qu'est-ce que le traitement de l'information ? Structure générale des ensembles électroniques de gestion. Le système binaire. — **Les matériels: Le « hardware »:** Unité centrale de l'ordinateur. Canaux-interface. La carte perforée. La bande perforée. Les imprimantes. Les bandes magnétiques. Disque, tambour, feuillets magnétiques. Caractères magnétiques et optiques. — **Les programmes d'exploitation:** Le « Software »: Les langages Cobol-Fortran. Les systèmes d'exploitation. Fichiers: leur mise à jour. — **Plan directeur d'un système informatique:** Critères de choix d'un système. Préinstallation, définition des données, analyse, programmation. Démarrage, entretien et évolution du système. Responsabilité du constructeur et de l'utilisateur. Le personnel, L'installation de l'équipement. **La télégestion:** Télégestion, terminaux et transmission. Matériel de création des données. Emploi et développement. Conseils pratiques. Annexe: vocabulaire. — 256 p. 21 × 27, 11 photos hors texte, 1969 ..... **F 40,00**

UN SERVICE ORGANISATION ET INFORMATIQUE DANS L'ENTREPRISE, POURQUOI ? COMMENT ? Saint-Antonin C. — Nécessité et conditions de succès d'un service organisation: La nécessité d'un service organisation. Conditions de succès d'un service organisation. **Missions. — Structure. — Modalité d'action du service organisation. — Organisation interne. — Analyse. — Programmation. — Exploitation:** Tâches du chef d'organisation. Problèmes relatifs au groupe « organisation ». Organisation du groupe d'analyse. Annexes techniques. Organisation groupe programmation. Organisation de l'atelier d'exploitation « ordinateur ». Pour une synthèse organisation-informatique. 452 p 16 × 24, tr. nbr. schémas et tabl., 1969 ..... **F 72,00**

INITIATION A L'INFORMATIQUE. (Classes terminales. G. Cours commerciaux. Poly J. et Poulain P. — L'information et son organisation. Généralités sur l'information et son traitement. La représentation de l'information. Les supports d'informations. L'organisation de l'information dans les supports usuels. — **Les matériels de traitement de l'information.** Machines à cartes perforées. Ordinateurs. Unités périphériques. — **La programmation.** Instructions et langage machine. Évolutions de la programmation. L'utilisation d'un ordinateur dans la gestion d'une entreprise. Évolution des méthodes d'utilisation des ordinateurs. 216 p. 16 × 25, 93 fig., cart., 1969 ..... **F 16,00**

INFORMATIQUE ET GESTION DE L'ENTREPRISE. Conso P. et Poulain P. — La place de l'informatique dans l'entreprise. — **L'information dans l'entreprise.** Définition de l'information. Saisie et collecte de l'information. Traitement de l'information. — **Systèmes intégrés.** Intégration et systèmes de gestion. Moyens et procédures. — **Intégration dans l'entreprise.** Interdépendance des fonctions. Fonctions commerciales. Fonctions de production et d'approvisionnement. Fonctions administratives et financières. Exemple d'un système intégré de gestion. — **Lancement d'un système intégré de gestion.** Études préalables. Choix du matériel. Mise en place d'un système intégré de gestion. Problèmes humains et psychologiques. 256 p 16 × 25, 1969 **F 22,00**

MATHÉMATIQUES MODERNES

MATHÉMATIQUES POUR MAMAN. Berman S. et Bezars R. — Aux mères de famille... Avertissement en forme de mode d'emploi. Quand un ensemble rencontre un autre ensemble. L'ABC de l'ACD. Subtile et séduisante algèbre des ensembles. Cultivez vos relations... avec application (applications, fonctions). Inventons les nombres ! (équipotence, cardinaux, ensembles de nombres). Quand 1 et 1 font 2... ou 10. Une étoile qui fait n'importe quoi (les opérations). Tout a un sens, ou presque (grandeurs orientées). S'il vous reste encore un peu de temps. Solutions des tests. Index. Symboles généraux. 240 p. 15,5 × 24, 258 fig., 10 planches illustr. (textes et fig. en quatre couleurs)., 1969 ... **F 28,00**

MATHÉMATIQUES POUR PAPA. Berman S. et Bezard R. — Par sa conception même cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui, anciens élèves de l'enseignement technique, secondaire et même supérieur, par souci d'aider leurs enfants, par nécessité professionnelle, par besoin de culture générale ou par désir de faciliter le dialogue avec la génération montante, veulent accéder aisément aux nouvelles mathématiques et ainsi approcher le domaine mystérieux des ordinateurs et, pour tout dire, vivre avec leur temps. — Premières notions sur les ensembles. Introduction à l'algèbre des ensembles. Questions de relations. La plume de ma tante et la notion de fonction. Équipotence; cardinaux. Nombres; opérations binaires. Opérations étoile ou loi de composition interne. L'analyse combinatoire au secours des confiseurs et des joueurs; dénombrement. Sur les pas d'Evariste Galois ou aperçus sur la théorie des groupes. Les anneaux. Notions sur les corps. Lois de composition externe. Les vecteurs. Brève incursion dans les espaces vectoriels et définition générale des vecteurs. Notes annexes et compléments. Index. Symboles généraux. 294 p. 15,5 × 24, 179 fig., 2 dépliants, nbr. planches illustrées, 1968 ..... **F 29,00**

PARENTS ET ENFANTS, COMPRENEZ LES MATHÉMATIQUES MODERNES. Rosenthal E.B. Traduit de l'américain. — Introduction aux mathématiques modernes: Comment lire ce livre. De quoi s'agit-il ? et pourquoi ? Premières notions. **Arithmétique et algèbre:** Nature des nombres et des symboles numériques. Les ensembles de nombres et leur structure. Jeudi précède-t-il lundi ou le suit-il ? Comblons les intervalles. **Géométrie analytique:** Des points d'une droite aux points d'un plan. **Les ensembles et la logique:** Compléments sur les ensembles. Attention à p et q ! **Les géométries euclidienne, non euclidienne et autres:** Discussion de la méthode euclidienne. Quittons Euclide. **Que veut tout cela ?** De nouvelles additions ? Conclusion. Liste de quelques termes et symboles nouveaux. 292 p. 15 × 22, 180 fig., nouveau tirage 1969 ... **F 19,00**

LES MATHÉMATIQUES MODERNES PAR L'EXEMPLE. De l'initiation à la pratique: Exposés, exemples, exercices, tests de contrôle ; à l'usage des élèves de la 6e à la 2e, des parents, des maîtres (Recyclage). **Bartoli C.** — La pensée mathématique moderne ; l'axiomatique. Théorie des ensembles. Relations binaires d'un ensemble vers un autre ensemble. Correspondances. Fonctions et applications. Relations binaires dans un ensemble. Lois de composition. Morphismes. Les ensembles de nombre. Lexique 230 p. 15 × 20, tr. nbr. fig. 1960 ..... **F 20,00**

MATHÉMATIQUES MODERNES. Problèmes et solutions. Niveau 1. Élèves du Premier Cycle. Débutants adultes. Recyclage. Bartoli C., Colin H. et Mathieu J. — Les ensembles. Relations binaires d'un ensemble vers un autre ensemble. Fonctions et applications. Relations binaires dans un ensemble. Les ensembles de nombres. 144 p. 15 × 20, tr. nbr. fig., 1970 ..... **F 13,00**

RADIO

NOUVEAUX MONTAGES PRATIQUES A TRANSISTORS ET CIRCUITS IMPRIMES. Fighiera H. — La réalisation des circuits imprimés. — Montage basse fréquence: avec étude de plusieurs préamplificateurs, mélangeurs et correcteurs; d'un oscillateur de vibrato, d'amplificateur BF de 900 mW et 2,2 W. — **Récepteurs et émetteurs** Récepteur simple PO-GO à multiples transformations, cadre antiparasite PO-GO-OC; alimentation secteur 9 V pour récepteurs à transistors, émetteur-récepteur expérimental 72 Mc/s; émetteur expérimental FM. — **Appareils de mesure:** Oscillateurs HF et BF pour le réglage des récepteurs; générateurs radio et TV tracer pour dépannage par signal tracing; adaptateur alternatif et continu pour améliorer la sensibilité d'un contrôleur universel. — **Electronique appliquée:** Déclencheur photoélectrique; détecteur de température, détecteur de métaux; clignoteurs à feux tournants. 142 p. 14,5 × 21,5, 150 fig., 2e édit., 1969 ..... **F 12,50**

PANNES TV (noir-blanc et couleurs). Symptômes. Diagnostic. Remèdes. Sorokine W. — Les 283 pannes décrites dans cet ouvrage, avec leurs symptômes et leur diagnostic, facilitent à l'extrême le travail de recherche du technicien dépanneur, à qui sont épargnés des tâtonnements inutiles. Il serait bien rare, en effet, qu'on ne puisse y trouver, sinon la réplique exacte de la panne qui nous met en difficulté, du moins un phénomène similaire qui indique la direction à suivre. 288 p. 13 × 21, 390 fig. et schémas, 5e édit., 1969 ..... **F 17,00**

TRANSISTORS A EFFET DE CHAMP. Œhmichen J.-P. — Les dispositifs. Les montages fondamentaux. Circuits impulsionnels. Les circuits modulateurs. Circuits d'utilisation en régime linéaire basse fréquence. Circuits d'utilisation en H.F., V.H.F. et U.H.F. Circuits des appareils de mesure. Le proche avenir des T.E.C. et MOST. 264 p. 16 × 24, 140 fig, 1969 ..... **F 33,00**

COMMENT CONSTRUIRE BAFFLES ET ENCEINTES ACOUSTIQUES. Brault R. — Généralités. Le haut-Parleur électrodynamique. Fonctionnement électrique, fonctionnement mécanique, fonctionnement acoustique du haut-parleur. Baffles et écrans plans. Coffrets clos. Enceintes acoustiques à ouvertures. Enceintes Bass-Reflex. Enceintes à labyrinthe acoustique. Enceintes à pavillon. Enceintes diverses. Réalisations pratiques d'enceintes et baffles. Réglage d'une enceinte acoustique. Conclusion. Haut-parleurs couplés à l'aide d'un filtre. Filtres. — 88 p. 14,5 × 21, nombreuses figures, 3e édit., 1970 ..... **F 15,00**

INTERPHONES ET TALKIES-WALKIES. Besson R. — Schémas d'une liaison hertzienne. Émetteur. Récepteur. Réglementation française. Réalisation des appareils. Schémas industriels de talkies-walkies (gamme des 27 MHz). Microphones H.F. (gamme 30 à 40 MHz). Principe des interphones. Interphones dirigés à commutation manuelle. Amplificateur pour interphone. Intercommunication totale automatique. Portiers électroniques. Interphones H.F. à liaison par le secteur. Interphones H.F. à boucle inductive, 192 p. 16 × 24, 42 illustr., 1969 ..... **F 27,80**

SCIENCES NATURELLES

GUIDE DES ROCHES ET MINÉRAUX. Pough F.H. Traduit de l'américain. — Introduction à l'étude des roches et des minéraux: Votre collection minéralogique. Les roches, les minéraux et leur localisation. Propriétés physiques des minéraux. Classification cristallographique. Classification chimique des minéraux. Essais pyrognostiques, techniques et autres critères d'identification. **Description minéralogique:** Les corps simples natifs. Les sulfures et les sulfosels. Les oxydes, Les hallogénures, Les carbonates. Les nitrates, Les borates. Les sulfates. Les phosphates, les arséniates, les vanadates et les uranates. Les tungstates (wolframates) et les molybdates. Les silicates. Les gisements d'uranium. Index et glossaire des termes géologiques et techniques. Index des roches et minéraux. 460 pages 11,5 × 18,5, 115 photos en noir, 150 photos en couleurs, nombreux dessins, relié, 1969 ..... **F 39,50**

PIERRES NOBLES. Splendeur et enchantements des minéraux et des cristaux. Metz R. Traduit de l'allemand. — Minéraux. Caractères distinctifs. Répartition. Genèse des minéraux. Pierres précieuses. Pierres fines. Pierres d'ornementation. Index alphabétique des espèces minérales. Index alphabétique. 256 pages 12,5 × 18, 148 photos couleurs, cartonné, nouvelle édition, 1969 **F 18,50**

LES COQUILLAGES. Histoire biologique des gastéropodes marins: Morphologie. Physiologie. Mode de reproduction. Classification. Marcy J. et Bot J. — Qu'est-ce qu'un coquillage ? Les gastéropodes. L'ancêtre et la torsion. Classification des gastéropodes. **La coquille:** Généralités. La forme. La taille. L'opercule. Formation de la coquille. Forme des spires; proportions et expressions mathématiques. Appareil cardio-vasculaire. Le sang des gastéropodes. Couleur et pigmentation. Les vrais colorants ou biochromes. Reproduction. **Les prédateurs:** Les perceurs et les venimeux. Substances anti-microbiennes et gastéropodes marins. 284 pages 16 × 24, 64 planches en noir et 16 en couleurs, relié, 1969 ..... **F 56,00**

LES FOSSILES EN COULEURS. Kirkaldy J.F. Traduit de l'anglais. — La nature des fossiles. La valeur scientifique des fossiles. L'apparition des fossiles. Les principaux groupes d'organismes fossiles. La collection et l'extraction des fossiles. L'identification des fossiles. 224 p. 12 × 18, 40 fig., 12 cartes et 2 photos hors texte couleurs, 183 fig 64 planches hors texte couleurs, cart., 1969 ..... **F 20,00**

GUIDE DES PLANTES MÉDICINALES. Schauenberg P. et Paris F. — Récolte et emploi des plantes médicinales. Plantes à alcaloïdes. Plantes à vitamines. Plantes à action antibiotique. Plantes à hétérosides sulfurés, cyanogéniques, phénoliques. Plantes à flavonosides. Plantes à hétérosides coumariniques Plantes à renonculosides. Plantes à anthracénosides. Plantes à tanin. Plantes à amers. Plantes à cardénolides. Plantes à saponosides. Plantes à essences et résines. Plantes contenant des acides. Plantes à glucides. Plantes

contenant des anorganica. — Quelques grandes figures de la médecine ancienne. Glossaire des termes botaniques. Abréviations usitées: en droguerie, pour le conditionnement. Répertoire des termes thérapeutiques et anatomiques. Répertoire des maladies et des traitements. Liste des principales plantes énumérées dans le capitulaire de Villis. Index: des noms français, des noms latins. 360 p. 11,5 × 19, 368 plantes analysées, 46 fig. en noir, 234 fig. couleurs, relié. 1969 ..... **F 39,50**

PLANTEZ ET ENTRETENEZ VOUS-MÊMES VOS ARBRES FRUITIERS (Coll. « Faites-le vous-même » n° 28). Auguste P. — L'outillage et son emploi. Où planter ? Que planter ? Quand et commet planter ? Apprenez à acheter un arbre fruitier. Anatomie d'un arbre fruitier. Formes des arbres. Taille de formation. Taille de fructification. Taille d'été et éclaircissage. Greffages. Entretien du verger. 64 p. 13,5 × 18, 152 photos et tabl., cart., 1970 ..... **F 8,00**

200 PLANTES D'APPARTEMENT EN COULEURS. Comment les choisir et les soigner. Kromdijk G. Traduit du hollandais. — Soins et culture des plantes d'appartement. Multiplication des plantes. Petites serres d'amateur. Coupes garnies et jardins miniatures. Séjour au jardin des plantes d'appartement. — 200 plantes d'appartement (Classement alphabétique) avec un texte particulier pour chacune des 200 espèces représentées. 224 p. 15,5 × 21, cart., 1969 ..... **F 21,00**

SPORTS

VOL A VOILE Jacquet G. — Éléments de technologie: Fuselage, ailes, empennage et gouvernes, commandes, atterrisseurs, crochets de treuillage et de remorquage, instruments de bord. **Moyens matériels. La progression:** Modes de lancements, parc planeurs, progression. De l'école à la compétition. **Aérodynamique et mécanique du vol:** Résistance de l'air. Sustentation. Polaire de l'aile et du planeur. Hypersustentation. **Météorologie:** Atmosphère. Nuages. Fronts. Météores dangereux. Utilisation vélivole des phénomènes atmosphériques. **Eléments de réglementation. — Organisation administrative du vol à voile en France:** Organismes officiels. Conditions à remplir pour pouvoir voler. Possibilités offertes. 238 p. 16 × 24, 125 fig, 26 photos, 1970 ..... **F 26,70**

KARATÉ-DO. Techniques de base. Assauts. Compétition. Habersetzer R. — Les principes fondamentaux: Les composantes générales (bases physiques et physiologiques, psychologiques, union du corps et de l'esprit), les fondements techniques originaux (les moyens pour une utilisation totale du corps, les facteurs d'efficacité des coups frappés). **Les techniques fondamentales:** Les techniques d'attaque et de contre-attaque (coups directs, coups indirects, techniques de jambes), les techniques de défense (blocages, blocages balayés, crochetés et fouettés, les esquives, les coups d'arrêt, les techniques de contrôle). **Les assauts:** Les formes d'étude conventionnelles et semi-conventionnelles, l'assaut libre, la compétition. **Les méthodes d'entraînement:** La mise en train, l'entraînement complémentaire (musculation, durcissement, exercices spéciaux), les techniques enchaînées. Kuatsu, index de 500 termes techniques, bibliographie complète, etc. 488 p. 16 × 24, 550 fig., 255 photos, 1969 .... **F 39,80**

RUGBY. Jeu et entraînement. Poulain R. — Introduction Petit rappel historique. Terrain, ballon, équipement, vestiaire. Préparation du rugbyman. L'entraînement. Le repos, l'alimentation, les soins. Conseils aux éducateurs. — **Technique individuelle et collective:** tenue du ballon. Les passes. Les contrôles de ballon. Le jeu au pied. La défense. Les moyens d'éviter la défense. Les feintes, Les mêlées. Entraînement à la mêlées. La touche. — **Tactiques:** Tableaux d'entraînement à la touche. Différentes tactiques de placement en touche. Le jeu des trois-quarts. La défense. L'ailier moderne. Le jeu des troisièmes lignes. Le jeu de l'arrière. Principes de tactique. La contre-attaque. — **Les procédés d'entraînement:** Exercices. Entraînement de spécialiste. Procédés d'entraînement. Grands jeux préparatoires au rugby. Petit rugby. Entraînement au jeu en profondeur. 224 p. 16 × 24, 141 fig., 156 photos, 2e édit., 1969 ..... **F 18,50**

FOOTBALL. Technique, jeu, entraînement. Garel F. — La technique: Principes généraux. Les surfaces de contact. Les contrôles. La conduite de balle; le dribble. La passe. Le jeu de tête. Volée, demi-volée. Le tir. La touche. La technique défensive. La technique du gardien de but. **Le jeu:** La tactique. L'organisation de jeu en mouvement. L'entraînement au jeu. L'organisation du jeu sur balle arrêtée. **Les séances d'entraînement:** Partie physique. Partie technique. Partie tactique. Stratégie, Conclusion. 302 fig., 62 photos, 1960 ..... **F 18,50**

POUR TIRER JUSTE. Macdonald Hastings. Traduit de l'anglais. — Premier principe. Du choix d'un fusil de chasse. Comment éviter d'être dangereux. Les leçons de chasse de Churchill. Le maniement d'armes. Épaulement et mouvement latéral. Pourquoi manque-t-on ? Règles d'or sur le terrain de chasse. Sachez ce que vous ne devez pas faire. Les carabines de petite puissance. Cartouches. De l'entretien d'un fusil. Propos sur les armes anciennes. Les accessoires. Conclusions. Appendice. 160 p. 15,5 × 20,5, 30 photos hors texte, 1969 ..... **F 21,00**

TRAITÉ DE TIR A LA CIBLE. Amitrano R. — Les armes: Les armes standard. Les armes libres. Les munitions. **Étude des armes:** Description d'une arme standard d'épaule type. Description d'une arme standart de poing type. Description d'une arme libre d'épaule. Description d'une arme libre de poing type. Entretien des armes. **Le tir élémentaire:** Initiation au tir à la carabine. Le réglage du tir. Les causes d'écarts en tir; leurs remèdes. **Les tirs de compétition:** Équipement du tireur. Les compétitions aux armes d'épaule. Les compétitions aux armes de poing. **Les règlements:** Règlements régissant les armes. Règlements ayant trait au tireur. Règlements concernant les épreuves. Organisation des compétitions. 312 p. 13,5 × 18, nombreux fig., 20 photos hors texte, 1970 ..... **F 37,50**

TRANSPORTS

LES TRAMWAYS PARISIENS. Robert J. — Étude historique: Avant 1874 : les ancêtres du tramway. 1874-1887 : le développement des tramways à chevaux. 1887-1900 l'épanouissement de la traction mécanique. 1900-1910: la « belle époque » des tramways parisiens. 1930-1938 : la disparition des tramways parisiens. **Etude technique:** Voies et tracés. Traction mécanique. Traction électrique. L'évolution du matériel roulant. **Étude particulière de divers réseaux ou lignes:** Les funiculaires de Bellevue et de Montmartre. Le funiculaire de Belleville. Le tramway du Raincy à Montfermeil. Le tramway d'Enghien à Montmorency. Le chemin de fer du Bois de Boulogne. Le Paris-Saint-Germain. Le Paris-Arpajon. Les chemins de fer de Grande Banlieue. Les lignes isolées de banlieue. Les tramways de Versailles. — **Appendice:** Liste des Compagnies. Évolution du trafic. Plans de voies. Inventaire du matériel roulant. Historique des lignes de tramways. Affectation des dépôts. 328 p., 21 × 27, 350 photos, 50 planches, relié toile, 2e édit., 1969.... **F 78,00**
Prix franco de port et d'emballage ..... **F 84,00**
Rappel (du même auteur et dans la même collection) :

NOTRE MÉTRO ..... **F 72,00**
Prix franco de port et d'emballage ..... **F 78,00**

COMMANDES PAR CORRESPONDANCE

Les commandes doivent être adressées à la LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, Paris (9e). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de chèque bancaire ou de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au Comtpe Chèque Postal de la Librairie : Paris 4192 - 26. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition, soit 10 % (avec un minimum de F 1,40). Taxe urgent : F 1,30. Envoi recommandé : France : F 1,30, étranger : F 2,60.

Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS (9e)

La Librairie est ouverte de 8 h 30 à 12 h 30 et de 14 h à 18 h 30. Fermeture du samedi 12 h au lundi 14 heures.

Le directeur de la publication : Jacques DUPUY — Dépôt légal : 1970, N° 70020 — Imp. des Dernières Nouvelles de Strasbourg

CENTRE INTERNATIONAL D'ÉTUDES PAR CORRESPONDANCE

"A la fin de ce cours, je vous dis ma satisfaction" écrit Guy G... comptable à ECOS (Eure). "Depuis ma rentrée du Service Militaire, mon salaire a été augmenté d'environ 50%. J'espère pouvoir exercer dans l'avenir une activité indépendante à mon compte personnel."

Mademoiselle Anne O..., de Grenoble, est responsable du service exportation d'une entreprise importante d'appareils électroniques et s'occupe non seulement de toute la correspondance anglaise de la firme mais encore de toutes les formalités exigées par la pratique de l'importation. "Grâce à vos cours, j'ai pu faire un bon démarrage, malgré une longue interruption dans la pratique de l'anglais."

Un bon avenir, c'est un bon métier

Parmi ses 240 cours, le CIDEC vous propose celui qui est exactement fait pour vous

C'est avec vous que le CIDEC étudie, d'abord, le niveau de vos connaissances et vos capacités à suivre les enseignements dont vous avez besoin. C'est la base solide de votre succès : vous connaître mieux.

En soixante ans d'expérience, les Cours CIDEC ont lancé des milliers et des milliers de jeunes gens et de jeunes femmes dans la vie. Une pédagogie ultra-moderne est au service de tous ceux qui aujourd'hui sont décidés à réussir.

Les Cours CIDEC ont des cours faciles et des cours difficiles. Des cours pour débutants et pour experts. 240 cours, techniques, commerciaux ou de culture générale. Des cours clairs, modernes, agréables à suivre, rédigés par les meilleurs professeurs. Des cours et des corrections personnalisés, adaptés à votre progression.

Voici la liste des carrières parmi lesquelles nous choisirons ensemble celle qu'il vous faut.

Electricité
Electronique
Informatique
Automobile
Aviation
Mécanique générale
Dessin industriel
Béton armé
Bâtiment
Travaux publics
Construction métallique
Chauffage
Réfrigération
Métré
Chimie
Matières plastiques
Photographie

Agronomie
Mécanique agricole

Secrétariat
Comptabilité
Finances
Droit
Représentation
Commerce
Commerce de détail
Commerce international
Gestion des entreprises
Langues
Enseignement général
Mathématiques
Publicité
Relations publiques

Journalisme
Immobilier
Assurances
Esthétique
Coupe et couture
Accueil et tourisme
Hôtellerie
Voyages
Culture générale
Navigation de plaisance

COURS CIDEC
FONDES EN 1909

CENTRE INTERNATIONAL D'ÉTUDES PAR CORRESPONDANCE

Veuillez m'envoyer votre documentation gratuite : votre brochure d'orientation professionnelle, votre brochure sur la spécialité qui m'intéresse. Sans aucun engagement de ma part. Je vous remercie de me répondre par retour du courrier.

(Écrivez en lettres majuscules.)

Nom .....
Prénom ..... Age .....
Rue ..... N° .....
Ville ..... N° Dép .....
Pays ..... Etes-vous marié ? .....
Profession (actuelle) .....
La spécialité qui vous intéresse .....
Aimeriez-vous préparer un diplôme d'Etat ? .....
Lequel ? .....
Etudes antérieures .....

2223

Deux brochures passionnantes,
gratuitement sur simple envoi du coupon-réponse.

Si le coupon-réponse a déjà été découpé, il vous suffit d'écrire pour recevoir nos brochures de tests.

Cours CIDEC
Département 2049
5 route de Versailles, 78 - La Celle-St-Cloud

ENCRES BRILLANTES BRANCHER FRÈRES - IMPRIMÉ EN FRANCE PRINTED IN FRANCE - IMP. BLANCHARD, PARIS-LE PLESSIS-ROBINSON

CETTE PERCEUSE ELECTRIQUE

a popularisé en France le "faites-le vous-même"

Vous pouvez l'obtenir aujourd'hui, complète avec ses

27 accessoires

pour seulement

183 F

ou si vous le préférez 39,60 F seulement par mois après le premier versement légal de 73,20 F

Aménagez votre maison vous-même pour jouir du grand confort à un tout petit prix.

Polissez votre argenterie : cuillers, couteaux, louches... retrouveront l'éclat du neuf.

Essayez-la d'abord GRATUITEMENT

Voici une chance unique d'acquérir la célèbre perceuse SKIL, Percez, sciez, meulez, polissez, affûtez électriquement. Vous pourriez vous attendre à payer au moins 183 F la perceuse seule... mais avec ses 27 accessoires c'est une affaire absolument unique. En un clin d'œil vous pouvez briquer parquets et meubles, percer des trous dans les murs, dans tous bois, dans tous métaux, faire des étagères, des armoires, un bar ou une discothèque ; vous pouvez enlever peintures et apprêts des vieux meubles pour en faire des pièces de collection. Il vous suffit de changer d'accessoire dans le mandrin de votre perceuse pour avoir une polisseuse, une scie, une meule, une ponceuse ou une " affûteuse ", à l'instant même !

Vous ne gardez le tout qu'à la condition d'être enchanté. Essayez le tout gratuitement avant de vous décider. Même si vous jugez bon de nous retourner l'ensemble, l'argent que vous aurez économisé à nos frais vaut à lui tout seul la peine d'essayer. Autrement, gardez la célèbre perceuse SKIL, avec son moteur infatigable garanti et ses 27 accessoires pour 183 F seulement (ou un premier versement légal de 73,20 F et 3 mensualités de 39,60 F si vous le préférez). Mais ne perdez pas de temps ! Pour votre essai gratuit de 10 jours – sans frais ni obligation d'achat – postez le coupon dès aujourd'hui. Vous vous compterez alors au nombre des Français heureux qui vivent mieux et moins cher, grâce à un outillage électrique !

Proloisirs, 27 - Evreux

ESSAI GRATUIT - SATISFACTION GARANTIE

Bon à renvoyer à : PROLOISIRS, 27-Evreux

Oui, envoyez-moi la fantastique perceuse électrique SKIL et ses 27 accessoires pour un essai gratuit de 10 jours. Si l'ensemble ne répond pas absolument à tous mes vœux, je vous le retournerai dans les dix jours et ne vous devrai rien. Sinon je réglerai le prix incroyablement bas de la perceuse et des 27 accessoires selon les conditions de paiement que j'ai indiquées ci-dessous. Il est bien entendu que si mon coupon vous parvient dans les 5 jours, vous joindrez à votre envoi la magnifique scie circulaire que je pourrai conserver GRATUITEMENT si je décide d'acquérir la perceuse SKIL.

☐ **VERSEMENTS ECHELONNES** : Je réglerai 73,20 F (+ 8 F de frais d'envoi) après 10 jours et 3 mensualités de 39,60 F

Agios : 9 F inférieurs au taux légal majoré des perceptions forfaitaires prévues par la loi. Le solde de la créance devient exigible en cas de non-paiement d'une de ces mensualités à son échéance.

☐ **PAIEMENT COMPTANT** : Je réglerai seulement 183 F (+ 8 F de frais d'envoi) après 10 jours : une économie supplémentaire de 9 F.

ATTENTION : Indiquez le voltage de votre réseau 110/130 V 220/240 V.

Nom _____ écrire en majuscules

Prénom _____

N° _____ Rue _____

N° Dépt _____ Ville _____

SIGNATURE OBLIGATOIRE

Si vous avez moins de 21 ans, signature des parents ou du tuteur légal.

9_601/911/194

En Cadeau

UNE SCIE CIRCULAIRE

si vous postez le bon dans les 5 jours

Agissez dès aujourd'hui et nous ajouterons à notre envoi cette Scie Circulaire qui coupe dans les bois, les métaux... sans éclats. Complet avec sa grande lame de 127 mm de diamètre, cet accessoire de grande valeur qui offre toutes les garanties de sécurité s'adapte facilement à votre perceuse, grâce au dispositif breveté Speed-lock.